



TUGAS AKHIR - TE 141599

**ANALISIS KESTABILAN *STEADY STATE* GENERATOR
PADA SISTEM JAMALI 500KV MENGGUNAKAN
*METODE POWER FLOW TRACING***

Imam Darmawan
NRP 07111645000058

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.
Dr. Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TE 141599

**GENERATOR *STEADY STATE* STABILITY ANALYSIS AT
JAMALI 500KV SYSTEM USING *POWER FLOW TRACING*
METHOD**

Imam Darmawan
NRP 07111645000058

Advisor
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.
Dr. Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "**Analisis Kestabilan *Steady State* Generator Pada Sistem JAMALI 500kV Menggunakan Metode *Power Flow Tracing***" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 25 Juni 2018



Imam Darmawan
NRP 07111645000058

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

**ANALISIS KESTABILAN *STEADY STATE*
GENERATOR PADA SISTEM JAMALI 500KV
MENGUNAKAN METODE *POWER FLOW*
*TRACING***

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

**Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

**Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.
NIP. 196404051990021001**

**Dr. Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T.
NIP. 198811082012121001**



-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

ANALISI KESTABILAN *STEADY STATE* GENERATOR PADA SISTEM JAMALI 500KV MENGGUNAKAN METODE *POWER FLOW TRACING*

Nama : Imam Darmawan
Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.
Dr. Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T.

ABSTRAK

Beban yang diberikan pada pembangkit dan jarak pembangkit listrik dengan beban dapat mempengaruhi kestabilan generator. Berdasarkan permasalahan tersebut, maka perlu dilakukan analisis kestabilan pada jaringan multi generator. Salah satu analisis yang dapat dilakukan adalah melakukan analisis kestabilan *steady state* pada generator. Analisis kestabilan *steady state* pada generator akan dilakukan dengan menggunakan metode *Power Flow Tracing* (PFT) serta menggunakan rugi-rugi saluran transmisi yang ada pada sistem. Metode ini digunakan untuk menyederhanakan bentuk multi generator menjadi bentuk mesin tunggal (*Single Machine Infinite Bus*, SMIB) agar mempermudah dalam proses analisis kestabilan *steady state* generator.

Pada Tugas Akhir ini dilakukan analisis kestabilan *steady state* pada Generator Tanara dan generator Bojanegara dengan rating 1000MW. Hasil analisa menggunakan metode PFT didapatkan batas kestabilan *steady state* pada generator Tanara dan Bojanegara adalah 910MW dan 2854MW. Perbandingan perhitungan menggunakan metode PFT dengan hasil simulasi didapatkan error sebesar 1%. Sehingga metode mesin tunggal PFT dapat merepresentasikan sistem multimesin yang sesungguhnya.

Kata Kunci : Kestabilan *steady state*, *Power Flow Tracing*, *Single Machine Infinite Bus*.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

GENERATOR *STEADY STATE* STABILITY ANALYSIS AT JAMALI 500KV SYSTEM USING *POWER FLOW TRACING* METHOD

Name : Imam Darmawan
Advisor : Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST. MT.

ABSTRACT

Loads given on generators and distance from power plant to load may affect the stability of the generator. Based on these problems, it is necessary to do stability analysis on multi generator network. One of the analysis that can be done is to do steady state stability analysis on generator. Steady state stability analysis on the generator will be done using Power Flow Tracing (PFT) method and using transmission line losses that exist in the system. This method is used to simplify the form of multi generator into single machine form (Single Machine Infinite Bus, SMIB) to facilitate in the process of stability analysis of steady state generator.

In this final project, steady state stability analysis on Tanara and Bojanegara Generators with 1000MW rating. The result of analysis using PFT method obtained steady state stability limit on generator of Tanara and Bojanegara are 910MW and 2854MW. Comparison of calculation using PFT method with simulation result got error equal to 1%. So the method of using a single machine PFT can represent a real multimachine system.

Keywords : *Steady state stability, Power Flow Tracing, Single Machine Infinite Bus.*

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil 'Alamin, segala puji dan syukur saya panjatkan kepada Allah SWT atas berkah dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul **“Analisis Kestabilan Steady State Generator Pada Sistem Jamali 500KV Menggunakan Metode Power Flow Tracing”**

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Atas selesainya penyusunan Tugas Akhir ini, saya sebagai penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. ALLAH SWT karena tanpaNya penulis tidak akan bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Kedua Orang tua saya dan Dian yang selalu medoakan, memberikan semangat dan memberikan motivasi agar saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT. dan Bapak Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST. MT. selaku dosen pembimbing yang telah bersedia memberikan saya saran untuk Tugas Akhir dan selalu memberikan bimbingan dalam mengerjakan Tugas sehingga saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Teman-teman sistem tenaga lintas jalur 2016 khususnya yang mengambil di Lab PSSL yaitu Arwan, Hasbi dan Yuangga yang selalu memberikan info dalam pengerjaan Tugas Akhir dan info untuk bimbingan serta memberikan motivasi dan semangat saat pengerjaan Tugas Akhir.

Serta kepada semua pihak yang telah membantu dalam masa perkuliahan dan pengerjaan Tugas Akhir. Besar harapan penulis dalam buku Tugas Akhir ini bisa memberikan masukan dan manfaat bagi pembaca. Penulis juga berharap mendapatkan kritik dan saran yang dapat membangun agar lebih baik lagi. Terima kasih

Surabaya, 25 Juni 2018

Penulis

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DAFTAR ISI

	HALAMAN
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN JUDUL	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	v
HALAMAN PENGESAHAN	vii
ABSTRAK.....	ix
<i>ABSTRACT</i>	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL	xix
 BAB I PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Metodologi Penelitian.....	2
1.6 Sistematika Laporan	3
1.7 Relevansi	4
 BAB II TEORI DASAR	 5
2.1 Kestabilan dalam Sistem Tenaga Listrik	5
2.1.1 Kestabilan Sudut Rotor	6
2.1.2 Kestabilan Frekuensi	9
2.1.3 Kestabilan Tegangan.....	9
2.2 Gangguan yang Mempengaruhi Kestabilan.....	9
2.2.1 Gangguan Akibat Hubung Singkat	10
2.2.2 Gangguan Akibat Starting Motor.....	10
2.2.3 Gangguan Akibat Penambahan Beban Secara Tiba-tiba.....	10
2.3 Kestabilan <i>Steady State</i>	11
2.3.1 <i>Single Machine Infinite bus</i> (SMIB) Kestabilan <i>Steady State</i> ..	13
2.4 <i>Power Flow Tracing</i>	14
2.4.1 PFT Menggunakan <i>Extended Incidence Matrix</i>	15
2.4.2 <i>Power Flow Tracing</i> Daya Aktif.....	15
2.4.3 <i>Power Flow Tracing</i> Daya Reaktif	16

BAB III DATA DAN METODOLOGI	21
3.1 Sistem Transmisi Jawa-Madura-Bali 500kV pada Tahun 2019	21
3.2 Data Saluran Transmisi JAMALI 500kV Tahun 2019.....	21
3.3 Kapasitas Pembangkit JAMALI 500kV Tahun 2019	24
3.4 Data Trafo JAMALI 500kV Tahun 2019	26
3.5 Data Beban JAMALI Tahun 2019	28
3.6 Metodologi	29
BAB IV HASIL SIMULASI DAN IMPLEMENTASI	33
4.1 Perbandingan Hasil Simulasi Aliran Daya	33
4.1.1 Perbandingan Pembangkitan Generator.....	33
4.1.2 Perbandingan <i>Losses</i> Saluran	33
4.2 Hasil <i>Power Flow Tracing</i>	38
4.2.1 Hasil Power Flow Tracing Daya Aktif	39
4.2.2 Hasil Power Flow Tracing Daya Reaktif	41
4.3 Pembentukan SMIB Kestabilan <i>Steady State</i>	46
4.4 Analisis Kestabilan <i>Steady State</i> Generator	51
4.4.1 Studi Kasus Generator Tanara	51
4.4.2 Pembentukan SMIB Generator Tanara.....	51
4.4.3 Analisis Kestabilan Steady State Generator Tanara	52
4.4.4 Validasi Hasil Hitungan Generator Tanara.....	52
4.4.5 Studi Kasus Generator Bojanegara	53
4.4.6 Pembentukan SMIB Geneator Bojanegara	54
4.4.7 Analisa Kestabilan Steady State Generator Bojanegara	55
4.4.8 Validasi Hasil Hitungan Generator Bojanegara.....	55
BAB V PENUTUP	57
5.1 Kesimpulan	57
5.2 Saran	57
DAFTAR PUSTAKA	59
LAMPIRAN A	61
A.1.SLD JAMALI 500kV 2019	61

DAFTAR GAMBAR

	HALAMAN
Gambar 2.1 Kestabilan Sistem Tenaga.....	6
Gambar 2.2 <i>Single Line Diagram</i> Generator dan Motor	7
Gambar 2.3 Diagram Impedansi Generator dan Motor	7
Gambar 2.4 Grafik Karakteristik Daya dan Sudut Rotor.....	8
Gambar 2.5 Sistem Tenaga Listrik Sederhana	11
Gambar 2.6 Diagram Fasor E dan V	12
Gambar 2.7 Kurva <i>Nose</i> Tegangan dan Daya	13
Gambar 2.7 Sistem Sederhana SMIB	14
Gambar 2.9 Pembentukan Bus Bayangan	17
Gambar 3.1 <i>Single Line Diagram</i> JAMALI 500kV tahun 2019.....	21
Gambar 3.2 <i>Flow Chart</i> Metodologi Pengerjaan.....	31
Gambar 4.1 Model SMIB Generator Tanara 1	52
Gambar 4.2 Simulasi SMIB Pada ETAP	53
Gambar 4.3 Model SMIB Generator Tanara 1	54
Gambar 4.4 Simulasi SMIB Pada ETAP	56

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DAFTAR TABEL

HALAMAN

Tabel 3.1 Data Saluran Transmisi JAMALI 500kV tahun 2019	21
Tabel 3.2 Data Kapasitas dan Reaktansi Pembangkit	24
Tabel 3.3 Reaktansi dan MVA Trafo JAMALI 500KV	26
Tabel 3.4 Data Beban Puncak JAMALI tahun 2019	28
Tabel 4.1 Perbandingan Total Pembangkitan ETAP dengan Matlab	33
Tabel 4.2 Perbandingan <i>Losses</i> Pada Program Matlab dan ETAP ...	34
Tabel 4.3 Hasil Power Flow Tracing Daya Aktif	39
Tabel 4.4 <i>Losses</i> Hasil PFT Daya Aktif dengan ETAP	41
Tabel 4.5 <i>Losses</i> Tiap Generator Hasil PFT Daya reaktif	41
Tabel 4.6 <i>Losses</i> Tiap Saluran Hasil PFT Daya reaktif	43
Tabel 4.7 Nilai Arus Tiap Generator	46
Tabel 4.8 Resistansi dan Reaktansi Ekuivalen Tiap Generator	49
Tabel 4.9 Perbandingan Hasil Simulasi ETAP dengan PFT	53
Tabel 4.10 Perbandingan Hasil Simulasi ETAP dengan PFT	56

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Setiap tahun kebutuhan akan daya listrik semakin meningkat dikarenakan banyaknya beban alat-alat listrik yang digunakan untuk membantu pekerjaan manusia baik di bidang industri maupun di bidang rumah tangga. Meningkatnya permintaan beban dapat menyebabkan meningkatnya beban pembangkitan yang diberikan pada pembangkit. Pada saat ini sistem kelistrikan saling terhubung (interkoneksi) pada satu jaringan besar. Beberapa pembangkit listrik terhubung pada jaringan interkoneksi untuk membagi beban pembangkitan pada tiap generator pembangkit. Generator pembangkit listrik membangkitkan daya sesuai dengan perubahan beban (fluktuasi beban) yang terdapat pada jaringan. Perubahan beban yang terjadi pada jaringan interkoneksi dapat menyebabkan osilasi pada sistem jaringan. Osilasi tersebut terjadi karena respon dari generator untuk mengikuti perubahan beban yang terjadi pada sistem jaringan. Osilasi yang terjadi terus menerus dapat mengalami penguatan dan menyebabkan generator menjadi tidak stabil dan tidak sinkron. Generator yang tidak stabil dan tidak sinkron dapat lepas dari jaringan interkoneksi dan berdampak buruk pada sistem jaringan karena generator lain harus siap untuk menggantikan generator yang lepas dari jaringan. Jika generator lain tidak dapat menggantikan *supply* daya dari generator yang lepas maka akan menyebabkan *voltage collapse* dan pemadaman pada daerah tertentu. Dengan adanya permasalahan tersebut perubahan beban yang terjadi pada sistem jaringan dapat disebut sebagai permasalahan kestabilan.[1]

Jaringan interkoneksi Jawa Madura Bali (JAMALI) 500kV adalah sistem jaringan multi mesin yang terdiri dari beberapa generator pembangkit yang terhubung untuk membagi beban pembangkitan. Banyaknya peralatan yang terhubung pada jaringan membuat jaringan multi mesin ini sulit dianalisis kestabilannya. Oleh karena itu digunakan beberapa metode untuk menyederhanakan sistem multi mesin generator menjadi sistem mesin tunggal atau biasa disebut dengan *single machine infinite bus* (SMIB). SMIB dipilih untuk membuat analisis menjadi sederhana dan cukup merepresentasikan sistem multi mesin dengan baik.[2] Hasil dari penyederhanaan jaringan multi mesin dapat digunakan untuk mencari batas kestabilan dari generator tertentu. Batas kestabilan *steady state* generator digunakan sebagai batas dalam pengoprasian generator agar generator beroperasi optimal.

1.2 Permasalahan

Hal yang menjadi permasalahan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini yaitu sebagai berikut:

1. Penyederhanaan sistem multi mesin menjadi mesin tunggal menggunakan metode *power flow tracing*
2. Analisis kestabilan *steady state* generator

1.3 Batasan Masalah

Untuk menyelesaikan masalah dalam Tugas Akhir ini, maka perlu diberi batasan-batasan sebagai berikut:

1. *Software* yang digunakan adalah ETAP 12.6 dan MATLAB 2013
2. Analisis dilakukan pada sistem kelistrikan transmisi Jawa-Madura-Bali (JAMLI) 500 kV pada tahun 2019
3. Generator yang dianalisa adalah generator Tanara dan generator Bojanegara

1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam Tugas Akhir ini :

1. Mendapatkan pemodelan SMIB generator JAMALI 500kV
2. Mendapatkan batas kestabilan *steady state* generator

1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur
Studi literatur yang dilakukan adalah dengan mempelajari informasi-informasi yang berkaitan dengan topik tugas akhir seperti teori tentang *power flow tracing*, pemodelan SMIB, dan teori kestabilan *steady state* generator.
2. Pengumpulan Data
Pengumpulan data yang dibutuhkan mulai dari *single line diagram*, data saluran, data trafo dan data beban sistem JAMALI 500kV pada tahun 2019.
3. Pemodelan sistem dan Simulasi
Setelah proses pengumpulan data dilakukan, selanjutnya melakukan pemodelan sistem dan simulasi dengan menggunakan *software* Matlab. Pada tahap simulasi ditentukan terlebih dahulu generator mana yang akan diteliti kestabilan *steady state*. Setelah itu menjalankan simulasi aliran daya (*load flow*) pada sistem jaringan

serta mencatat nilai daya transfer dari generator dan daya yang diserap oleh beban.

4. Analisis Data

Setelah melakukan simulasi, tahap selanjutnya adalah menganalisis hasil yang diperoleh dari simulasi dengan menggunakan metode *Power flow tracing* untuk mendapatkan parameter-parameter tertentu yang digunakan dalam membentuk SMIB untuk analisa kestabilan *steady state*.

5. Penarikan Kesimpulan Dan Penulisan Buku Laporan

Tahap akhir untuk penelitian ini adalah penarikan kesimpulan dan penyusunan laporan tugas akhir berdasarkan dari pengolahan data yang diperoleh, analisa data, dan hasil yang diperoleh pada sistem.

1.6 Sistematika Laporan

Pembahasan tugas akhir ini dibagi menjadi lima bab dengan sistematika sebagai berikut:

BAB I : Pendahuluan

Pada bab pendahuluan ini akan dibahas mengenai latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika pembahasan dan relevansi.

BAB II : Dasar Teori

Pada bab ini secara garis besar akan diterangkan teori mengenai kestabilan *steady state*, *power flow tracing*, dan *SMIB*.

BAB III : Metodologi dan Data .

Pada bab ini membahas sistem JAMALI 500 kV pada tahun 2019, data saluran transmisi, kapasitas pembangkitan, data pembebanan dan metologi simulasi dengan software MATLAB dan ETAP.

BAB IV : Simulasi dan Analisis

Pada bab ini dilakukan simulasi dengan menggunakan software MATLAB untuk mendapatkan total *losses* dari generator yang dianalisa. Membuat bentuk SMIB dan menganalisa kestabilan *steady state* pada generator terhadap perubahan beban yang terjadi pada jaringan dan dibandingkan dengan hasil simulasi pada ETAP.

BAB V : Penutup

Pada bab ini dijelaskan mengenai kesimpulan dan saran mengenai analisis kestabilan *steady state* yang telah dikerjakan.

1.7 Relevansi

Diharapkan dari Tugas Akhir ini mendapatkan hasil yang dapat bermanfaat dan bisa digunakan sebagai referensi pada analisa selanjutnya tentang analisa kestabilan *steady state* sistem Jawa-Madura-Bali (JAMALI) 500 kV pada tahun 2019.

BAB II

TEORI DASAR

2.1 Kestabilan dalam Sistem Tenaga Listrik

Kestabilan sistem tenaga listrik adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk menjaga keadaan sistem tetap sinkron dan seimbang ketika terjadi gangguan pada sistem. Kategori gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik dapat digolongkan menjadi 2 jenis yaitu:

1. Gangguan Kecil

Gangguan kecil merupakan gangguan berupa perubahan pembebanan pada pembangkit akibat permintaan beban yang berubah-ubah secara signifikan. Hal ini dapat mengganggu kinerja dari generator karena harus mengikuti perubahan tersebut.

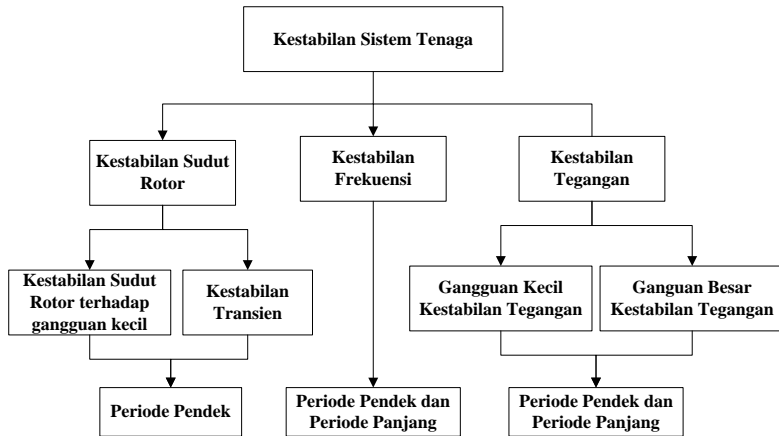
2. Gangguan Besar

Gangguan besar merupakan gangguan berupa perubahan besar suatu nilai yang terjadi secara mendadak pada sistem tenaga listrik dan dapat seketika itu juga mengganggu kestabilan dari sistem. Gangguan ini tidak boleh dibiarkan terlalu lama agar tidak mengganggu sistem.

Gangguan yang terjadi pada sistem dapat menyebabkan masalah kestabilan dari sistem tenaga listrik. Kestabilan sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga kategori, yaitu[3] :

1. Kestabilan Sudut Rotor
2. Kestabilan Frekuensi
3. Kestabilan Tegangan

Pada kestabilan sudut rotor dapat dibagi menjadi menjadi 2 jenis kestabilan yaitu kestabilan gangguan kecil (*steady state*) dan kestabilan transien. Pada kestabilan tegangan juga dapat dibagi menjadi 2 jenis kestabilan tegangan yaitu kestabilan tegangan gangguan kecil dan kestabilan tegangan gangguan besar. Untuk lebih jelas mengenai pengelompokan kestabilan dapat dilihat pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 Kestabilan Sistem Tenaga[3]

Gambar 2.1 menjelaskan mengenai kestabilan sistem tenaga dengan adanya gangguan kecil maupun besar pada periode waktu tertentu yang dapat mempengaruhi kestabilan sistem.

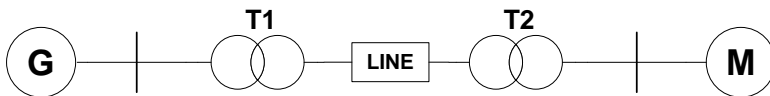
2.1.1 Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor merupakan kemampuan dari beberapa mesin sinkron yang saling terhubung pada suatu sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi agar tetap sinkron pada saat setelah terjadi gangguan pada sistem. Kemampuan mesin sinkron untuk menjaga kestabilan dipengaruhi oleh kemampuan untuk mempertahankan keseimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik pada tiap mesin sinkron yang terhubung pada sistem. Ketidakstabilan dapat mengakibatkan perubahan kecepatan sudut rotor yang ekstrim sehingga dapat membuat generator kehilangan sinkronisasi.[1]

Pada saat sistem bekerja dalam kondisi *steady state* terdapat kesetimbangan antara torsi elektrik dan torsi mekanik dari masing-masing generator yang terhubung dengan sistem. Jika sistem mengalami gangguan, titik kesetimbangan ini akan berubah dan mengakibatkan percepatan atau perlambatan sudut rotor suatu generator. Ketika salah satu generator berputar lebih cepat dari generator yang lain, terjadi perbedaan posisi sudut rotor dengan generator yang berputar lebih pelan. Perbedaan sudut ini dapat terjadi karena adanya gangguan yang terjadi pada sistem. Berdasarkan gangguan yang terjadi pada sistem, kestabilan sudut rotor dapat dibagi menjadi 2 kategori yaitu [1]:

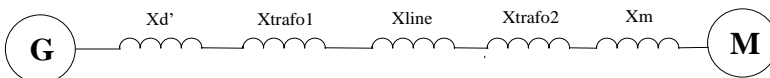
1. Kestabilan sudut rotor akibat gangguan kecil atau dapat disebut dengan kestabilan *steady state*. Gangguan kecil yang sering terjadi dikarenakan perubahan beban secara bertahap dan terus menerus.
2. Kestabilan sudut rotor akibat gangguan besar atau dapat disebut kestabilan transient. Gangguan besar yang terjadi biasanya disebabkan karena adanya hubung singkat pada sistem.

Salah satu karakteristik terpenting dalam kestabilan sistem tenaga listrik adalah hubungan antara perubahan daya dan posisi rotor pada mesin sinkron.



Gambar 2.2 Single Line Diagram Generator dan Motor[1]

Gambar 2.2 merupakan *single line diagram* generator dan motor yang terhubung oleh *line* transmisi pada suatu jarak tertentu. *Line* transmisi memiliki nilai resistansi dan reaktansi yang bergantung dari panjang *line* transmisi yang digunakan. Semakin panjang *line* transmisi maka akan menghasilkan *line charging* yang semakin besar sehingga nilai reaktansinya semakin dominan. Dalam proses penggambaran diagram impedansi dari saluran transmisi hanya nilai reaktansi yang digambarkan karena nilai resistansinya yang kecil. X_L adalah reaktansi induktif yang diperhitungkan pada reaktansi *line* transmisi dari kasus ini. Simbol **G** mewakili generator, sedangkan simbol **M** mewakili motor sinkron. Baik generator dan motor memiliki nilai impedansi yang berbeda-beda (X_G dan X_M). Trafo juga memiliki nilai impedansi yang berbeda-beda bergantung pada nilai kapasitas trafo itu sendiri. Sehingga berdasarkan diagram impedansi dari Gambar 2.2 dapat digambarkan pada Gambar 2.3 sebagai berikut:



Gambar 2.3 Diagram Impedansi Generator dan Motor[1]

Untuk membedakan sudut δ diantara rotor generator dan rotor motor, dengan menggunakan daya generator sebagai penyuplai motor

sebagai fungsi pembeda. Terdapat tiga komponen yang membedakan sudut δ yaitu:

1. Sudut generator internal
2. Sudut motor internal
3. Pada generator dan motor terdapat perbedaan sudut tegangan

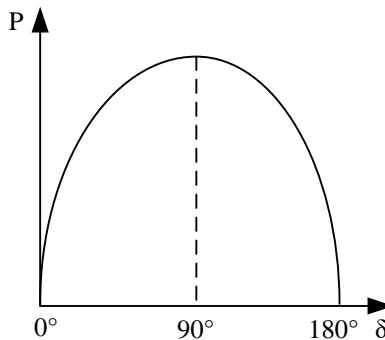
Sudut ketika medan putar stator didahului oleh rotor pada generator disebut dengan sudut generator internal δ_G . Sudut tegangan motor yang didahului oleh tegangan generator dinyatakan sebagai δ_L . Dan δ_M adalah sudut motor internal yang terjadi ketika medan putar stator mendahului rotor. Sehingga persamaan untuk mencari nilai δ dapat dilihat pada persamaan 2.1:

$$\delta = \delta_G + \delta_M + \delta_L \quad (2.1)$$

Daya yang ditransfer dari generator ke motor dapat dituliskan persamaan 2.2[4]:

$$P = \frac{E_G E_M}{X_T} \sin \delta \quad (2.2)$$

Hubungan antara daya terhadap sudut rotor, dapat digambarkan dalam grafik pada gambar 2.4 berikut:



Gambar 2.4 Grafik Karakteristik Daya dan Sudut Rotor[4]

Dengan menggunakan pemodelan yang ideal pada rotor generator, nilai daya yang dibangkitkan generator bervariasi dan memiliki grafik sinus terhadap nilai sudut rotor. Berdasarkan grafik pada Gambar 2.4, Ketika berada pada sudut nol derajat, tidak ada daya yang ditransfer dari generator. Saat sudutnya ditingkatkan, transfer daya semakin meningkat hingga titik maksimum. Titik maksimum pada sudut rotor merupakan sudut 90°. Jika daya terus dinaikkan maka akan menyebabkan generator

menjadi tidak stabil. Titik 90° ini merupakan batas nilai kestabilan *steady-state*[4].

2.1.2 Kestabilan Frekuensi

Kestabilan frekuensi merupakan kemampuan sistem untuk mempertahankan nilai frekuensi yang stabil pada saat terjadi gangguan yang disebabkan ketidakseimbangan antara daya yang dibangkitkan dengan permintaan daya beban, jika keadaan ini terjadi dalam waktu yang lama maka dapat menyebabkan lepasnya beberapa generator yang ada pada sistem serta dapat menimbulkan pelepasan beban secara paksa pada sistem[5].

2.1.3 Kestabilan Tegangan

Kestabilan tegangan adalah kemampuan sistem untuk tetap menjaga tegangan agar tetap stabil pada setiap bus saat terjadi gangguan pada sistem. Sistem tidak stabil dapat menyebabkan terjadinya turun atau naiknya tegangan pada beberapa bus bahkan dapat menyebabkan terjadinya *voltage collapse*. Kemungkinan yang terjadi apabila tegangan tidak stabil mengakibatkan pelepasan beban atau lepasnya transmisi dikarenakan sistem proteksi terlalu cepat bekerja. Tidak sinkronnya antar generator dapat terjadi akibat pelepasan tersebut atau kondisi arus melewati batas yang ditentukan. Klasifikasi kestabilan tegangan dapat dibagi dalam dua kategori, yaitu[1]:

1. Kestabilan Tegangan Akibat Gangguan Kecil
Kemampuan sistem tenaga untuk menjaga kondisi tegangan tetap stabil ketika mengalami gangguan kecil seperti perubahan pada permintaan beban pada sistem secara mendadak dan berulang-ulang.
2. Kestabilan Tegangan Akibat Gangguan Besar
Kemampuan dari sistem tenaga untuk menjaga tegangan agar tetap stabil setelah mengalami gangguan besar seperti gangguan generator yang lepas dari jaringan dan terjadinya gangguan *short circuit*.

2.2 Gangguan yang Mempengaruhi Kestabilan

Terdapat beberapa gangguan yang terjadi pada suatu sistem tenaga listrik yang dapat mengganggu kestabilan dari suatu sistem. Berikut merupakan beberapa gangguan yang dapat mempengaruhi kestabilan sistem.

2.2.1 Gangguan Akibat Hubung Singkat

Hubung singkat merupakan suatu gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik. Gangguan ini dapat terjadi karena beberapa hal diantaranya akibat sambaran petir, kebocoran isolasi dan kerusakan peralatan. Gangguan hubung singkat dapat mengakibatkan hal yang sangat merugikan karena dapat mengalirkan arus yang sangat besar pada titik hubung singkat. Aliran arus yang besar ini membuat sistem menjadi tidak stabil. Jika peralatan yang terdapat pada titik gangguan tidak dapat menahan lonjakan arus yang besar tersebut maka akan menyebabkan kerusakan yang berkelanjutan pada tiap peralatan lain. Arus besar yang mengalir menuju titik gangguan merupakan arus kontribusi dari generator dan motor yang terhubung pada sistem[5].

2.2.2 Gangguan Akibat Starting Motor

Pada suatu sistem yang memiliki motor dengan daya yang besar, sangat perlu untuk memperhatikan sistem starting motor tersebut. Starting motor dapat mengakibatkan lonjakan arus yang besar hingga $4x$ atau $6x$ dari arus nominalnya. Kenaikan arus ini berlangsung sampai motor mencapai 80% dari kecepatan sinkronnya. Kenaikan arus yang besar dapat membuat tegangan menjadi drop sehingga mengganggu kestabilan sistem. Drop tegangan yang terjadi terus-menerus dapat mengurangi umur dari peralatan yang digunakan. Oleh karena itu dibutuhkan metode starting yang tepat untuk menjaga kestabilan sistem[5].

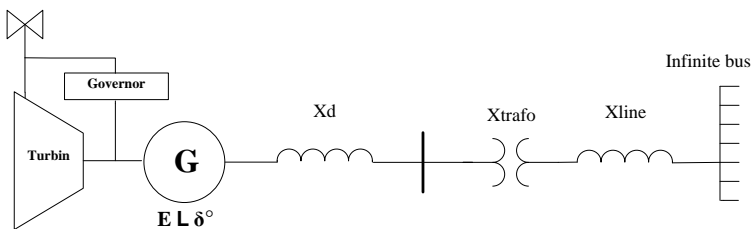
2.2.3 Gangguan Akibat Penambahan Beban Secara Tiba-tiba

Penambahan beban secara tiba-tiba dapat dikategorikan sebagai gangguan apabila beban yang ditambahkan melebihi batas kemampuan dari pembangkit. Penambahan beban kecil yang berosilasi terus menerus juga dapat mempengaruhi kinerja generator. Penambahan beban secara tiba-tiba dapat membuat arus yang mengalir akan menjadi naik secara tiba-tiba dan membuat tegangan dan frekuensi menjadi menurun dengan cepat. Keadaan ini dapat membuat sistem jadi kehilangan sinkronisasi antar peralatan. Pada sisi generator, daya output yang dikeluarkan generator akan lebih besar dari pada masukan daya mekanis dari penggerak generator. Berkurangnya putaran generator dapat membuat frekuensi menurun, sudut daya δ bertambah besar dan melampaui sudut kritisnya, akibatnya generator akan lepas sinkron atau tidak stabil.[6]

2.3 Kestabilan *Steady State*

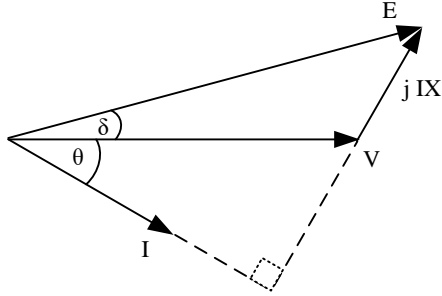
Kestabilan *steady state* merupakan kemampuan sistem tenaga listrik untuk menjaga sistem agar tetap stabil pada saat terjadi gangguan kecil yang terjadi secara berulang. Kemampuan suatu generator untuk menjaga kestabilan sangat bergantung pada torsi elektromagnetik dan torsi mekanik. Torsi elektromagnetik bergantung dari pengaturan tegangan pada AVR generator, sedangkan torsi mekanik bergantung dari pengaturan putaran turbin yang diatur oleh governor. Salah satu ciri masalah kestabilan *steady state* generator adalah bergesernya titik operasi suatu pembangkit dari daerah aman menuju daerah kritis akibat dari perubahan sistem secara perlahan namun terus menerus[6]. Perubahan sistem biasanya dipengaruhi oleh perubahan permintaan beban yang berubah-ubah secara signifikan. Perubahan permintaan beban ini dapat menyebabkan tegangan turun secara drastis dan generator akan mengalami *out of synchron*. Jarak pembangkit dengan beban juga dapat mempengaruhi kinerja generator karena semakin jauh generator semakin besar rugi-rugi yang terjadi pada saat proses transfer daya oleh generator. [4]

Secara garis besar kestabilan *steady state* dapat dijelaskan menggunakan sistem sederhana pada Gambar 2.5 sebagai berikut:



Gambar 2.5 Sistem Tenaga Listrik Sederhana[4]

Dapat dilihat pada Gambar 2.5 hanya ada rangkaian seri sederhana generator, reaktansi generator, reaktansi trafo, reaktansi kabel dan infinite bus. Nilai E merupakan tegangan internal generator dan sudut daya (δ) merupakan sudut antara E dan tegangan bus. Untuk menjelaskan besar sudut daya dapat menggunakan diagram fasor pada Gambar 2.6 sebagai berikut:



Gambar 2.6 Diagram Fasor E dan V[4]

Persamaan daya riil yang diterima pada *infinite bus* dapat dilihat pada persamaan 2.3

$$P = V I \cos \theta \quad (2.3)$$

Persamaan 2.3 dapat ditulis dengan bentuk lain dengan memanfaatkan aturan sinus yang diimplementasikan pada segitiga pada Gambar 2.6 seperti yang dapat dilihat pada persamaan 2.4:

$$\frac{E}{\sin(90+\theta)} = \frac{I X}{\sin \delta} \quad (2.4)$$

Dengan demikian persamaan 2.3 dapat dirubah menjadi persamaan baru pada persamaan 2.5 dan persamaan 2.6:

$$P = \frac{E V}{X} \sin \delta \quad (2.5)$$

$$E = V + I (R + jX) \quad (2.6)$$

$$I = \frac{S}{3 V_{\phi}} \quad (2.7)$$

Dengan:

E = Tegangan internal generator

V = Tegangan pada *infinite bus*

X = Reaktansi ekuivalen

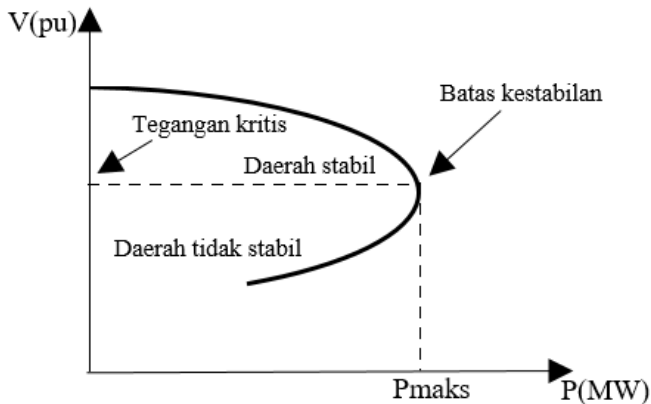
I = Arus beban

δ = Sudut antara E dan V

Sistem akan berjalan stabil terjadi pada saat nilai $\delta < 90^\circ$ [6]. Jika sudut daya terus dinaikkan maka generator akan kehilangan sinkronisasi dengan sistem. Batas sinkronisasi ini merupakan batas kestabilan *steady state* generator. Sehingga persamaan untuk mencari nilai Daya maksimum pembebanan generator dapat dilihat pada persamaan 2.8:

$$P_{maks} = \frac{E V}{X} \quad (2.8)$$

Pada persamaan 2.8 tersebut dapat dilihat bahwa nilai P_{maks} sangat bergantung pada nilai reaktansi total antara generator dan beban. Semakin jauh jarak dari generator ke beban, nilai P_{maks} akan semakin kecil yang berarti daya maksimum yang bisa di transfer ke beban akan semakin terbatas. Nilai P_{maks} juga dapat di implementasikan pada kurva *nose* pada Gambar 2.7 sebagai berikut:



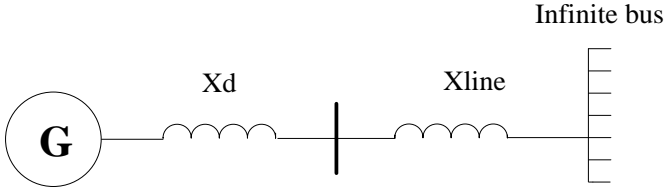
Gambar 2.7 Kurva *Nose* Tegangan dan Daya[4]

Dapat dilihat pada Gambar 2.7 Sebelum melewati batas kestabilan (P_{maks}), sistem berada pada daerah stabil. Setelah melewati batas kestabilan maka sistem akan memasuki daerah tidak stabil dimana tegangan dan daya akan menurun.

2.3.1 *Single Machine Infinite bus (SMIB) Kestabilan Steady State*

SMIB merupakan cara menyederhanakan sistem multi mesin menjadi mesin tunggal. Cara ini dapat mempermudah perhitungan analisis kestabilan yang terjadi pada sistem interkoneksi. Pada tugas akhir

ini akan menggunakan SMIB untuk menganalisis nilai kestabilan *steady state* generator yang akan dianalisa. Sistem sederhana yang sering dijadikan patokan dalam melakukan analisa kestabilan *steady state* yang dilakukan para ahli dapat dilihat pada Gambar 2.7 berikut[7]:



Gambar 2.8 Sistem Sederhana SMIB[7]

Pada Gambar 2.7 Generator di rangkai seri dengan reaktansi sinkron generator, reaktansi trafo, reaktansi saluran transmisi dan bus infinite. Nilai tegangan pada *infinite bus* adalah besaran yang tetap dan sering diasumsikan 1 p.u pada jaringan yang besar[6].

Untuk menghitung nilai reaktansi saluran dapat menggunakan persamaan 2.9:

$$X_{line} = \frac{Q_{loss}/MVAbase}{I_g^2} \quad (2.9)$$

Dimana Q_{loss} merupakan *losses* daya reaktif dari aliran daya generator yang di dapat dari hasil *Power Flow Tracing*. Untuk mencari arus generator menggunakan persamaan 2.10:

$$I_g = \frac{P_{gen}/MVAbase + Q_{gen}/MVAbase}{V_g} \quad (2.10)$$

Setelah nilai reaktansi diketahui, maka dapat dilanjutkan untuk menganalisa kestabilan *steady state* generator sesuai dengan rumus pada subab sebelumnya.

2.4 Power Flow Tracing

Power flow tracing (PFT) adalah suatu metode untuk mencari kontribusi daya yang disalurkan generator untuk mencukupi permintaan beban dalam suatu sistem tenaga listrik. Dengan mengetahui kontribusi daya generator, maka dapat diketahui pula besar daya *losses* yang terjadi

pada penyaluran daya generator. Daya *losses* digunakan untuk membentuk sistem SMIB dari generator yang dianalisa.

Metode PFT hanya dapat digunakan pada jaringan tanpa *losses*. Sehingga untuk jaringan dengan *losses* perlu dimodifikasi dengan menambahkan bus bayangan pada tiap saluran yang terdapat *losses* jaringan. *Losses* jaringan dapat disebabkan oleh adanya resistansi, reaktansi dan *line charging* pada saluran transmisi yang panjang[4].

2.4.1 PFT Menggunakan *Extended Incidence Matrix*

Extended Incidence Matrix (EIM) merupakan satu matriks yang digunakan untuk mengetahui hubungan antar bus yang terinterkoneksi pada suatu jaringan. Untuk membentuk EIM, rugi-rugi yang terdapat pada suatu sistem tenaga listrik yang diakibatkan adanya resistansi, reaktansi, dan *line charging* dari saluran transmisi dimodelkan tetap dan dimasukkan pada kedua bus terminal saluran. Pemodelan ini akan membuat sistem menjadi sistem tanpa *losses* (*Lossless Power Network*, LPN).[8]

EIM pada sistem LPN ini diumpamakan sebagai matriks A dengan dimensi $n \times n$, dimana n merupakan jumlah bus dari suatu sistem interkoneksi. Matriks A dapat didefinisikan pada persamaan 2.11 berikut:

$$A = a_{ij} = \begin{bmatrix} -P_{ij} & \text{untuk } i \neq \text{dan } P_{ij} > 0 \\ 0 & \text{untuk } i \neq \text{dan } P_{ij} < 0 \\ P_{Ti} & \text{untuk } i = j \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Aliran daya dari bus i ke bus j dinamai P_{ij} , sedangkan total aliran daya yang masuk ke bus i dinamai P_{Ti} . Matriks A atau a_{ij} merupakan total aliran daya yang masuk pada bus i dan aliran daya yang masuk ke bus i dari bus lainnya.[8]

2.4.2 *Power Flow Tracing Daya Aktif*

Untuk melakukan proses *power flow tracing* pada daya aktif hal pertama yang dilakukan adalah membentuk matriks A dengan cara yang sudah dijelaskan pada subab sebelumnya. Matriks A dapat di validasi kebenarannya dengan cara menjumlahkan seluruh elemen pada setiap baris dari matriks A. Hasil dari penjumlahannya harus sama dengan beban daya aktif (P_L). Selain itu, cara validasi yang lainnya yaitu dengan menjumlahkan seluruh elemen dari tiap kolom pada matriks A. Hasil penjumlahan ini sama dengan daya keluaran generator (P_G). [8]

- **Pemodelan Power Flow Tracing Daya Aktif**

Dalam melakukan pemodelan PFT pada daya aktif diperlukan beberapa elemen matriks terlebih dahulu. Matriks pertama yang dicari adalah matriks P_{GG} dengan menggunakan persamaan 2.12[8]:

$$P_{GG} = \text{diag}(P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{Gn}) \quad (2.12)$$

Dengan demikian, diperoleh persamaan 2.13:

$$P_G = P_{GG} \cdot A^{-1} \cdot P_L \quad (2.13)$$

Berikutnya mencari matriks K, dimana matriks K merupakan matriks *Distribution Factor Matrix* (DFM) dengan menggunakan persamaan 2.14:

$$K = P_{GG} \cdot A^{-1} \quad (2.14)$$

- **Kontribusi Pembebanan dan Losses**

Kontribusi aliran daya aktif dari generator pada bus-i menuju beban pada bus-j dapat dinotasikan seperti pada persamaan 2.15[8]:

$$P_{i \rightarrow j} = K_{i \rightarrow j} P_{Lj} \quad (2.15)$$

Untuk menghitung nilai losses generator terhadap sistem yang melalui saluran s-t dapat dihitung menggunakan persamaan 2.16:

$$P_{Loss_{i \rightarrow s-t}} = K_{p-i \rightarrow s} Loss_{s-t} \quad (2.16)$$

Dimana nilai

$$Loss_{s-t} = P_{st} + P_{ts} \quad (2.17)$$

$$P_{Loss_{i \rightarrow s-t}} = \text{Losses dari generator bus-i terhadap saluran s-t}$$

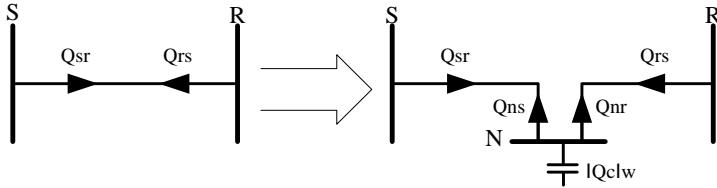
$$P_{st} = \text{Daya aktif dari bus s menuju ke bus t}$$

$$P_{ts} = \text{Daya aktif dari bus t menuju ke bus s}$$

2.4.3 Power Flow Tracing Daya Reaktif

Dalam melakukan *power flow tracing* pada daya reaktif, terdapat beberapa hal yang harus diperhatikan yaitu *line charging* dan pembangkit daya reaktif lainnya. Kedua hal tersebut nantinya akan diubah menjadi bus bayangan di antara saluran untuk merepresentasikan sumber daya reaktif. Penambahan bus bayangan pada tiap saluran yang mengandung *line charging* akan membuat pemodelan untuk sistem menjadi lebih

banyak lagi. Untuk membuat bus bayangan dapat dilihat Gambar 2.9 sebagai berikut[9]:



Gambar 2.9 Pembentukan Bus Bayangan [9]

Dapat dilihat pada Gambar 2.9, Q_{sr} merupakan aliran daya reaktif yang mengalir dari bus S menuju bus R, Q_{rs} merupakan aliran daya reaktif yang mengalir dari bus R menuju bus S sedangkan N merupakan bus bayangan yang dibuat diantara saluran bus S dan bus R. Terdapat pula Q_c yang merepresentasikan sumber daya reaktif. Dengan adanya bus bayangan maka akan menambah saluran baru antara bus bayangan dengan bus asli. *Losses* daya reaktif dari saluran baru tersebut diasumsikan setengah dari *losses* daya reaktif dari saluran aslinya. Nilai-nilai dalam pembentukan bus fiktif dengan persamaan 2.18, persamaan 2.19, dan persamaan 2.20[9]:

$$Q_{sr} + Q_{Ns} = 0,5 \times |Q_{Loss}|_u \quad (2.18)$$

$$Q_{rs} + Q_{Nr} = 0,5 \times |Q_{Loss}|_u \quad (2.19)$$

$$Q_{Ns} + Q_{Nr} = |Q_c|_w \quad (2.20)$$

Dimana nilai:

$$s, r = 1, 2, \dots, N_B$$

$$u = 1, 2, \dots, N_L$$

$$w = N_B + w$$

- **Pembentukan Matriks Daya Reaktif Power flow tracing**

Langkah pertama dari algoritma mencari nilai daya reaktif pada tiap cabangnya setelah ditambah dengan bus bayangan dapat dimodelkan pada matriks A_1 seperti persamaan 2.21:

$$[A_1]_{ij} \begin{cases} Q_{ij}, & \text{Untuk } i \neq j \text{ dan } Q_{ij} < 0 \\ [Q_s]_i - \sum_{Q_s < 0} N_B + N_C, & \text{Untuk } i = j \\ 0, & \text{Untuk kondisi lainnya} \end{cases} \quad (2.21)$$

Nilai Q_s merupakan sumber dari daya reaktif. Jika pada saluran terdapat nilai *line charging*, maka nilai Q_s akan bersal dari sumber generator dan daya reaktif dari *line charging*. Sehingga didapatkan persamaan Q_s yang dapat dilihat pada persamaan 2.22:

$$Q_s = \begin{bmatrix} Q_G \\ Q_c \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Pada bus beban, untuk pembentukan matriksnya, dapat direpresentasikan pada persamaan 2.23:

$$Q_D = [Q_{Load}] \quad (2.23)$$

Pada persamaan (2.21), mengindikasikan bahwa nilai dari elemen baris ke-I dan kolom ke-J sama dengan nilai negatif dari daya reaktif yang mengalir pada pada saluran tersebut ($Q_{ij} < 0$). Sedangkan untuk elemen diagonal dari matriks A_1 merupakan total dari daya reaktif yang terdapat pada bus tersebut. Untuk persamaan elemen diagonal dari matriks A_1 , dapat dirumuskan pada persamaan 2.24:

$$A_{1(i=j)} = \begin{cases} Q_s - \sum(Q_{saluran} < 0), & \text{jika Bus Generator} \\ 0 - \sum(Q_{saluran} < 0), & \text{jika Bus Beban} \end{cases} \quad (2.24)$$

Untuk membuktikan, apakah nilai dari matriks A_1 sudah benar atau tidak, bisa dikoreksi dengan cara menjumlahkan elemen baris ke-I dari matriks A_1 . Jumlah dari elemen baris ke-I dari matriks A_1 bernilai sama dengan nilai daya reaktif yang dihasilkan dari sumber (Q_s). Elemen matriks diagonal dari A_1 selalu bernilai positif.

Dalam proses pelacakan aliran daya reaktif, dibutuhkan matriks B_1 yang merepresentasi hubungan aliran daya reaktif pada bus terhadap saluran. Matriks B_1 hanya bernilai 1 atau 0, seperti pada persamaan 2.25:

$$[B_1]_{il} = \begin{cases} 1, & \text{jika } Q_{saluran-i} = Q_{ik} > 0 \\ 0, & \text{jika kondisi lainnya} \end{cases} \quad (2.25)$$

Pada persamaan (2.21), menunjukkan bahwa bernilai 1 jika terdapat aliran daya reaktif yang bernilai positif pada aliran daya bus terhadap saluran, dan selain dari persyaratan tersebut bernilai 0. Atau menunjukkan bahwa bus-i merupakan aliran daya reaktif terhadap saluran l yang bernilai positif.

- **Kontribusi Pembebanan dan Losses**

Kontribusi reaktif *power flow tracing* dapat dibentuk dari kontribusi sumber terhadap beban dan kontribusi generator terhadap nilai *losses*. Berikut merupakan persamaan yang diterapkan untuk menemukan kontribusi setiap sumber daya reaktif yang dikonsumsi oleh setiap beban atau terbuang melalui setiap cabang (*losses*)[9]:

$$E = (A_1^T)^{-1}(Q_D + B_1 Q_L) \quad (2.26)$$

Dengan nilai Q_s yang diperoleh dari elemen diagonal dari matriks A_1 , seperti pada persamaan 2.27:

$$Q_s = \text{diag}(Q_s)E = \text{diag}(Q_s)(A_1^T)^{-1}(Q_D + B_1 Q_L) \quad (2.27)$$

Untuk mengetahui kontribusi aliran daya reaktif dibutuhkan elemen matriks S_1 dan S_2 , dengan persamaan seperti pada persamaan 2.28 dan persamaan 2.29:

$$S_1 = \text{diag}(Q_s)(A_1^T)^{-1} \quad (2.28)$$

$$S_2 = S_1 B_1 \quad (2.29)$$

Setelah matriks S_1 dan S_2 telah terbentuk, maka persamaan 2.30 dapat digunakan untuk menentukan berapa banyak konsumsi daya reaktif dari beban (r) terhadap sumber pada bus- i [9]:

$$Q_{\text{source}-i} \rightarrow \text{Load}-r = [S_1]_{ir}[Q_D]_r \quad (2.30)$$

Untuk nilai $i = 1, 2, \dots, (N_B + N_C)$ dan nilai $r = 1, 2, \dots, N_B$

dan untuk kontribusi sumber pada bus i terhadap kerugian reaktif dari cabang l juga dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.31[9]:

$$Q_{\text{source}-i} \rightarrow \text{Loss}-j = [S_2]_{ij}[Q_L]_j \quad (2.31)$$

Untuk nilai $i = 1, 2, \dots, (N_B + N_C)$ dan $j = 1, 2, \dots, (N_L + N_C)$

Dimana nilai S_2 merupakan matriks pembentukan dari persamaan (2.29) dan untuk nilai Q_L merupakan nilai *losses*.

Untuk menghitung nilai kontribusi *losses* oleh masing-masing generator, ada beberapa syarat kondisi, diantaranya yaitu[9]:

1. Jika pada saluran tidak memiliki nilai *line charging*, dimana saluran ini merupakan trafo antara generator dan bus. Persamaan mencari kontribusi *losses* adalah sebagai berikut:

$$Q_{source-i} \rightarrow_{Loss-j} = [S_2]_{ij}[Q_L]_j \quad (2.32)$$

Untuk nilai $i = 1, 2, \dots, (N_B+N_C)$ dan $j = 1, 2, \dots, (N_L+N_C)$

2. Jika pada saluran memiliki nilai *line charging*, maka persamaan mencari kontribusi *losses* adalah sebagai berikut:

$$Q_{source-i} Q_{source-i} \rightarrow_{Loss-j} = \sum [S_2]_{ij}[Q_L]_j \quad (2.33)$$

Untuk nilai $i = 1, 2, \dots, (N_B+N_C)$ dan $j = 1, 2, \dots, (N_L+N_C)$

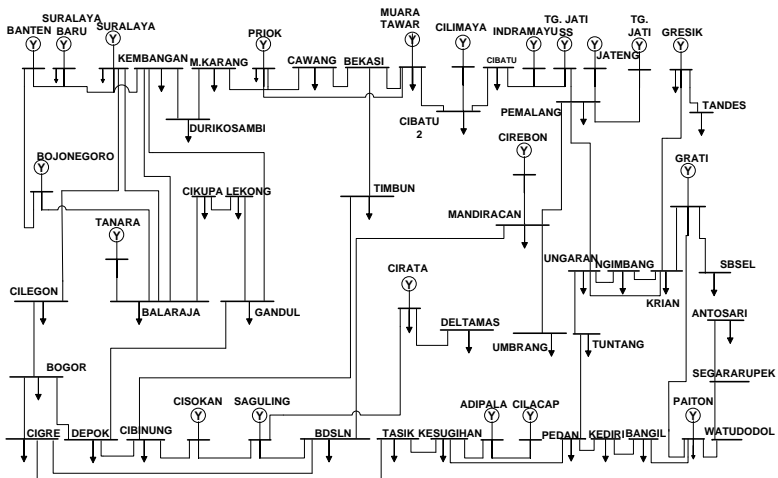
Pada kondisi ini, kontribusi *losses* merupakan total dari nilai kontribusi generator-i yang mengalir pada saluran j.

BAB III DATA DAN METODOLOGI

Pada bab ini akan dibahas mengenai data yang diperlukan untuk melakukan analisis kestabilan *steady state* dan membahas tentang metodologi simulasi yang akan dijalankan.

3.1 Sistem Transmisi Jawa-Madura-Bali 500kV pada Tahun 2019

Untuk menganalisa kestabilan *steady state* pada sistem transmisi Jamali 500kV pada tahun 2019 dapat digambarkan dengan menggunakan *single line diagram* pada Gambar 3.1 berikut ini:



Gambar 3.1 *Single Line Diagram* JAMALI 500kV tahun 2019

3.2 Data Saluran Transmisi JAMALI 500kV Tahun 2019

Untuk melakukan simulasi sistem JAMALI 500 kV dibutuhkan data saluran antara bus yang ada pada sistem. pada tabel 3.1 menunjukkan data impedansi dan panjang dari saluran tranmisi JAMALI 500 kV.

Tabel 3.1 Data Saluran Transmisi JAMALI 500kV tahun 2019

Dari Bus	Ke Bus	R (pu)	X (pu)	0.5B (pu)	Jarak (Km)
Suralaya Baru	Suralaya	5.0549E-06	6.19E-05	0.015	1.25

Dari Bus	Ke Bus	R (pu)	X (pu)	0.5B (pu)	Jarak (Km)
Cawang	Bekasi	0.00020896	0.001897	0.085	16.84
Tuntang	Pedan	0.00028902	0.002795	0.665	56.00
Cawang	MuaraTawar	0.00059546	0.005409	0.24	48.00
Ungaran	Tuntang	0.00011354	0.001	0.261	22.00
Cilegon	Suralaya	6.441E-05	0.000622	0.15	12.48
Suralaya	Balaraja	0.00038716	0.003151	0.74	62.76
Gresik	Tandes	5.4191E-05	0.000524	0.125	10.50
Sby Selatan	Grati	0.00033621	0.00273	0.64205	54.50
Ujung Berang	Mandiracan	0.00107222	0.009740	0.4325	86.43
Paiton	Watudodol	0.00052976	0.006489	1.57286	131.00
Kediri	Bangil	0.0004423	0.004277	1.016123	85.70
Ungaran	Ngimbang	0.00248517	0.022577	1.0025	200.33
Ngimbang	Krian	0.00063244	0.005745	0.255	50.98
Gresik	Krian	0.00014744	0.001199	0.281	23.90
Ungaran	Krian	0.00315345	0.028648	1.271196	254.20
Krian	Grati	0.00040984	0.003963	0.941544	79.41
Depok	Gandul	3.6539E-05	0.000297	0.07	5.92
Depok	Cibinung	9.6051E-05	0.000781	0.185	15.57
Bangil	Paiton	0.00048215	0.004663	1.11	93.42
Pemalang	Mandiracan	0.00067534	0.008272	2	167.00
Watudodol	Segararupek	1.8392E-05	0.000205	0.05	4.12
Cirata	Saguling	0.00015525	0.001263	0.2965	25.17
Saguling	Bandung Selatan	0.00020128	0.001946	0.465	39.00
Ujung Berng	Bandung Selatan	0.00040801	0.003706	0.165	32.89
Bandung Selatan	Mandiracan	0.00048244	0.005909	1.43208	119.30
Tasik	Kesugihan	0.00055997	0.005416	1.287	108.50
Kesugihan	Adipala	5.5928E-05	0.000685	0.1655	13.83
Adipala	Cilacap	1.937E-05	0.000237	0.06	4.79

Dari Bus	Ke Bus	R (pu)	X (pu)	0.5B (pu)	Jarak (Km)
Kesugihan	Pedan	0.00101157	0.009783	2.325	196.00
Segararupek	Antosari	0.0004141	0.005072	1.225	102.40
Pedan	Kediri	0.00105544	0.010208	2.425	204.50
Paiton	Grati	0.00045605	0.004410	1.05	88.36
Kembangan	Gandul	0.00015557	0.001504	0.36	30.14
Banten	Suralaya Baru	5.3732E-06	4.37E-05	0.01	0.87
Banten	Bojanegara	7.1622E-05	0.000582	0.136774	11.61
Bojanegara	Balaraja	0.00037014	0.003012	0.707	60.00
Tanara	Balaraja	8.4837E-05	0.001039	0.251	20.98
Priok	Muara Tawar	6.0659E-05	0.000743	0.18	15.00
Muara Karang	Durikosambi	6.0659E-05	0.000743	0.18	15.00
Muara Karang	Priok	4.0439E-05	0.000495	0.121215	10.00
Kembangan	Durikosambi	1.2132E-05	0.000148	0.0358	3.00
Kembangan	Balaraja	0.0002753	0.003663	0.17	32.85
Cikupa	Balaraja	3.7406E-05	0.000458	0.11064	9.25
Cikupa	Lekong	8.0879E-05	0.000990	0.24242	20.00
Lekong	Gandul	9.8703E-05	0.000803	0.19	16.00
Cilegon	Bogor	0.00142985	0.012990	0.57675	115.26
Bogor	Depok	0.00015756	0.001282	0.30088	25.54
Cigereleng	Tasik	0.00043874	0.004243	1.01	85.01
Bogor	Cigereleng	0.00057316	0.004664	1.095	92.91
Bekasi	MuaraTawar	7.9765E-05	0.000649	0.155	12.93
Cilamaya	Cibatu Baru	0.00018469	0.002262	0.5463	45.67
Muara Tawar	Cibatu Baru	0.00017739	0.001715	0.41	34.37
Cibatu Baru	Cibatu	2.5805E-05	0.000249	0.06	5.00
Deltamas	Cibatu	1.0322E-05	9.98E-05	0.025	2.00
Cirata	Deltamas	0.00022244	0.002151	0.511025	43.10
Tj Jati - SS	Pemalang	0.0005338	0.006538	1.58	132.00
Jateng	Pemalang	8.0879E-05	0.000990	0.242705	20.00

Dari Bus	Ke Bus	R (pu)	X (pu)	0.5B (pu)	Jarak (Km)
Pemalang	Ungaran	0.00036711	0.003550	0.845	71.13
Pemalang	Tanjung Jati	0.00073276	0.008975	2.17	181.20
Tanjung Jati	Ungaran	0.00069571	0.006728	1.603289	134.80
Cirebon	Mandiracan	4.0439E-05	0.000495	0.12	10.00
Indramayu	Tj Jati - SS	0.0003697	0.004528	1.095	91.42
Deltamas	Indramayu	0.00036464	0.004466	1.08	90.17
Cigereleng	Bandung Selatan	6.5958E-05	0.000637	0.151529	12.78
Bekasi	Tambun	6.5144E-05	0.000530	0.127125	10.56
Cibinung	Tambun	0.00013516	0.001100	0.263116	21.91
Cibinung	Cisokan	0.0003541	0.003424	0.815	68.61
Cisokan	Saguling	0.00010074	0.000974	0.2315	19.52
Bogor	Cibinung	0.00027875	0.002532	0.117367	22.47

3.3 Kapasitas Pembangkit JAMALI 500kV Tahun 2019

Pada sistem kelistrikan Jamali pada tahun 2019 terdapat data pembangkitan dan reaktansi pembangkit dapat dilihat pada Tabel 3.2 sebagai berikut:

Tabel 3.2 Data Kapasitas dan Reaktansi Pembangkit

Bus Pembangkit	Nama Pembangkit	MW	Xd' (pu)
Suralaya Baru	Pltu Slaya Baru	370	0.0375
	Pltu Slaya4	290	0.0381
	Pltu Slaya5	430	0.0367
	Pltu Slaya6	430	0.0367
	Pltu Slaya7	438.19	0.036
Muara Tawar	Pltgu Mtwar Gb1.1	110	0.0269
	Pltgu Mtwar Gb1.2	110	0.0269
	Pltgu Mtwar St1.0	180	0.0309
	Pltgu Mtwar Gt 5.1	190	0.0247
	Pltgu Mtwar 2.0	160	0.0348
	Pltgu Mtwar 3.0	160	0.0348
	Pltgu Mtwar 4.0	160	0.0348

Bus Pembangkit	Nama Pembangkit	MW	Xd' (pu)
Tanjung Jati	Pltu Tjati 3	475	0.0392
	Pltu Tjati 4	475	0.0392
	Pltu Tjati 5	660	0.0244
	Pltu Tjati 6	660	0.0244
Gresik	Pltgu Gresik Sb3	150	0.0297
	Pltgu Jawa 3.1	225	0.0675
	Pltgu Jawa 3.2	375	0.0405
Cirata	Plta Cirata1	65	0.0352
	Plta Cirata2	65	0.0352
	Plta Cirata3	65	0.0352
	Plta Cirata4	65	0.0352
Grati	Pltgu Grati Gb1.1	95	0.0231
	Pltgu Grati Gb1.2	95	0.0231
	Pltgu Grati Gb1.3	95	0.0231
	Pltgu Grati Sb1.0	155	0.0287
	Pltgu Grati Sb2.0	120	0.1266
Saguling	Plta Saguling1	80	0.0289
	Plta Saguling2	80	0.0289
Adipala	Pltu Adipala	400	0.0478
Cilacap	Pltu Cilacap1	415	0.0460
	Pltu Cilacap2	655	0.0363
Paiton	Pltu Paiton3	600	0.0331
	Pltu Paiton5	460	0.0281
	Pltu Paiton6	460	0.0281
	Pltu Paiton7	460	0.0281
	Pltu Paiton8	460	0.0281
Priok	Pltgu Priok	550	0.0276
Bojanegara	Pltu Bojanegara1	675	0.0352
	Pltu Bojanegara2	675	0.0352
Tanara	Pltu Tanara1	675	0.0352
	Pltu Tanara1	675	0.0352
Cirebon	Pltu Cirebon	670	0.0355
Indramayu	Pltu Indramayu	670	0.0355
Tjatia-Ss	Pltu Tjatia-Ss1	400	0.056

Bus Pembangkit	Nama Pembangkit	MW	Xd' (pu)
	Pltu Tjatia-Ss2	400	0.056
Cisokan	Plta Cisokan1	180	0.1369
	Plta Cisokan2	180	0.1322
	Plta Cisokan3	180	0.1322
Cilamaya	Pltgu Cilamaya1	505	0.0443
	Pltgu Cilamaya2	505	0.0443
Jateng	Pltu Jateng1	575	0.0413
	Pltu Jateng2	575	0.0399
Banten	Pltu Banten	400	0.0502

3.4 Data Trafo JAMALI 500kV Tahun 2019

Pada sistem kelistrikan Jamali pada tahun 2019 terdapat data trafo dapat dilihat pada Tabel 3.3 sebagai berikut:

Tabel 3.3 Reaktansi dan MVA Trafo JAMALI 500KV

No	Nama Pembangkit	MVA Trafo	Xtrafo (pu)
1	Pltu Slaya Baru	750	0.016
2	Pltu Slaya4	470	0.0255
3	Pltu Slaya5	750	0.0160
4	Pltu Slaya6	750	0.0160
5	Pltu Slaya7	750	0.0160
6	Pltgu Mtwar Gb1.1	377.5	0.0450
7	Pltgu Mtwar Gb1.2	377.5	0.0450
8	Pltgu Mtwar St1.0	300	0.0567
9	Pltgu Mtwar Gt 5.1	470	0.0255
10	Pltgu Mtwar 2.0	300	0.0483
11	Pltgu Mtwar 3.0	300	0.0483
12	Pltgu Mtwar 4.0	300	0.0483
13	Pltu Tjati 3	786	0.0210
14	Pltu Tjati 4	786	0.0210
15	Pltu Tjati 5	1200	0.0121
16	Pltu Tjati 6	1200	0.0121
17	Pltgu Gresik Sb3	250	0.054
18	Pltgu Jawa 3.1	470	0.0309
19	Pltgu Jawa 3.2	750	0.0193

No	Nama Pembangkit	MVA Trafo	Xtrafo (pu)
20	Plta Cirata1	279.9	0.0643
21	Plta Cirata2	279.9	0.0643
22	Plta Cirata3	279.9	0.0643
23	Plta Cirata4	279.9	0.0643
24	Pltgu Grati Gb1.1	153	0.0771
25	Pltgu Grati Gb1.2	307.5	0.0384
26	Pltgu Grati Gb1.3	307.5	0.0384
27	Pltgu Grati Sb1.0	250	0.0552
28	Pltgu Grati Sb2.0	240	0.0604
29	Plta Saguling1	412.3	0.0437
30	Plta Saguling2	412.3	0.0437
31	Pltu Adipala	750	0.016
32	Pltu Cilacap1	750	0.016
33	Pltu Cilacap2	1200	0.0121
34	Pltu Paiton3	1008	0.0167
35	Pltu Paiton5	650	0.0185
36	Pltu Paiton6	650	0.0185
37	Pltu Paiton7	650	0.0185
38	Pltu Paiton8	650	0.0185
39	Pltgu Priok	1020	0.0142
40	Pltu Bojanegara1	1250	0.0116
41	Pltu Bojanegara2	1250	0.0116
42	Pltu Tanara1	1250	0.0116
43	Pltu Tanara1	1250	0.0116
44	Pltu Cirebon	1250	0.0116
45	Pltu Indramayu	1250	0.0116
46	Pltu Tjatia-Ss1	720	0.02014
47	Pltu Tjatia-Ss2	720	0.02014
48	Plta Cisokan1	300	0.04833
49	Plta Cisokan2	300	0.04833
50	Plta Cisokan3	300	0.04833
51	Pltgu Cilamaya1	1020	0.01422
52	Pltgu Cilamaya2	1020	0.01422
53	Pltu Jateng1	1250	0.0116

No	Nama Pembangkit	MVA Trafo	Xtrafo (pu)
54	Pltu Jateng2	1250	0.0116
55	Pltu Banten	750	0.016

3.5 Data Beban JAMALI Tahun 2019

Data beban JAMALI pada tahun 2019 yang terdapat pada tabel 3.4 merupakan data pembebanan pada kondisi puncak.

Tabel 3.4 Data Beban Puncak JAMALI tahun 2019

No.	Bus GITET	BEBAN	
		MW	MVAR
1	Antosari	694.300	336.2646
2	Bandung Selatan	165.500	80.1554
3	Bekasi	348.400	168.7378
4	Balaraja	901.900	436.8101
5	Bangil	418.900	202.8824
6	Bogorx	212.700	103.0152
7	Cibatu	803.500	389.1529
8	Cibatu Baru	328.500	159.0998
9	Cibinong	475.200	230.1499
10	Cigereleng	353.100	171.0140
11	Cikupa	591.200	286.3313
12	Cilegon	392.400	190.0480
13	Cirata	182.200	88.2433
14	Cawang	691.300	334.8118
15	Depok	440.900	213.5377
16	Deltamas	412.800	199.9283
17	Duri Kosambi	542.000	262.5025
18	Gandul	1094.600	530.1389
19	Grati	443.500	214.7970
20	Gresik	44.800	21.6977

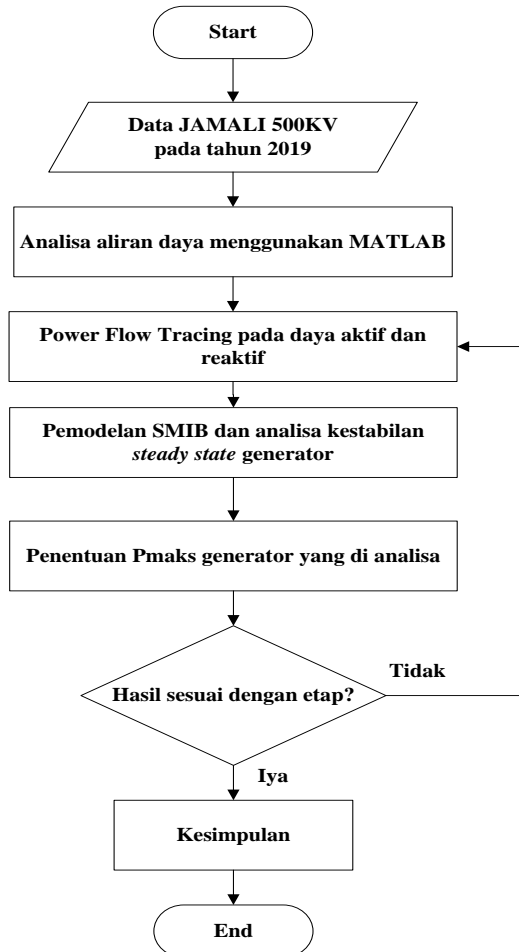
No.	Bus GITET	BEBAN	
		MW	MVAR
21	Kediri	710.200	343.9655
22	Kembangan	422.600	204.6747
23	Krian	864.200	418.5511
24	Kesugihan	734.000	355.4922
25	Lekong	620.400	300.4733
26	Mandiracan	360.400	174.5495
27	Muarakarang	217.300	105.2430
28	Muara Tawar	285.400	138.2255
29	Ngimbang	487.900	236.3007
30	Pedan	548.200	265.5053
31	Paiton	515.500	249.6682
32	Pemalang	307.900	149.1227
33	Priok	624.400	302.4109
34	Surabaya Selatan	495.400	239.9330
35	Suralaya	27.900	13.5126
36	Suralaya Baru	65.900	31.9167
37	Tasik	358.800	173.7749
38	Tanjung Jati	507.500	245.7935
39	Tambun	440.300	213.2469
40	Tandes	263.500	127.6190
41	Tuntang	435.100	210.7284
42	Ujung Berung	352.700	170.8205
43	Ungaran	118.900	57.5859

3.6 Metodologi

Untuk mendapatkan hasil analisa yang diharapkan, maka dibutuhkan simulasi untuk pemodelan sistem yang sesungguhnya. Berikut ini adalah urutan metodologi pengerjaan yang digunakan untuk tugas akhir ini:

1. Aliran Daya
Untuk mengetahui aliran daya pada sistem dilakukan analisa aliran daya dengan menggunakan *software* Matlab dengan MVA base 100MVA. Analisa aliran disimulasikan dengan menggunakan data-data beban, data saluran, dan data pembangkitan dari data sistem transmisi Jamali 500 kV pada tahun 2019. Hasil aliran daya harus sama dengan hasil aliran daya pada ETAP agar bisa di lanjutkan pada proses selanjutnya.
2. *Power flow tracing*
Power flow tracing merupakan tahap awal untuk proses mereduksi sistem multimesin menjadi sistem mesin tunggal. Power flow tracing akan mencari kontribusi generator pada tiap beban yang ada pada sistem. Dengan mengetahui kontribusi dari tiap generator, maka dapat diketahui pula *losses* aliran daya generator yang terdapat pada saluran transmisi. *Losses* pada tiap generator ini yang nantinya akan diproses menjadi nilai resistansi dan reaktansi saluran pada pemodelan mesin tunggal generator yang akan dianalisa.
3. Pemodelan SMIB
Tahap ini digunakan untuk mempermudah analisa kestabilan *Steady state* multimesin maka digunakan model SMIB pada generator yang akan dianalisa. Pemodelan ini memanfaatkan nilai *losses* yang di dapat dari hasil power flow tracing untuk membentuk impedansi jaringan transmisi.
4. Analisa Kestabilan *Steady State*
Pada tahap ini akan dilakukan analisa kestabilan *steady state* dengan mencari nilai daya maksimal (Pmaks) yang terbangkit dari generator yang dianalisa.
5. Pembuktian analisa dengan ETAP
Hasil analisa yang sudah dilakukan sebelumnya dibuktikan dengan menggunakan simulasi ETAP.
6. Penarikan Kesimpulan
Penarikan kesimpulan dilakukan jika hasil analisa sama dengan hasil ETAP. Nilai Pmaks ini merupakan nilai maksimum pembebanan pada generator yang dianalisa agar kestabilan tetap terjaga pada sistem JAMALI 500kV.

Flowchart dari metodologi pengerjaan yang dilakukan pada gambar 3.2 sebagai berikut:



Gambar 3.2 *Flow Chart* Metodologi Pengerjaan

Dapat dilihat pada Gambar 3.2 merupakan *flow chart* pengerjaan dari tugas akhir ini. Dimulai dari memasukkan data JAMALI 500kV pada

Matlab dan melakukan proses *power flow Tracing* serta membandingkan hasil analisa dengan sistem sesungguhnya pada ETAP.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB IV

HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai hasil simulasi dari *software* yang digunakan untuk memodelkan sistem yang sesungguhnya serta membahas mengenai analisis kestabilan *steady state* pada generator yang akan dianalisa dalam bentuk *single machine*.

4.1 Perbandingan Hasil Simulasi Aliran Daya

Sebelum melakukan analisa perhitungan kestabilan *steady state* menggunakan model SMIB hasil *power flow tracing*, harus dipastikan terlebih dahulu hasil program aliran daya pada Matlab sudah sama dengan hasil simulasi pada ETAP. Hasil yang dibandingkan adalah pembangkitan generator dan *losses* saluran.

4.1.1 Perbandingan Pembangkitan Generator

Pembangkitan generator yang terjadi pada sistem bergantung pada jumlah beban yang ada pada sistem. Pada Tabel 4.1 berikut merupakan perbandingan total pembangkitan generator hasil program Matlab dengan simulasi pada ETAP.

Tabel 4.1 Perbandingan Total Pembangkitan ETAP dengan Matlab

<i>Software</i>	Beban		Pembangkitan Generator	
	MW	MVAR	MW	MVAR
Etap	19302	9348.433	19428	3371.342
Matlab	19302.1	9348.433	19428.8	3371.336

Dapat dilihat pada Tabel 4.1 hasil program menggunakan Matlab dengan simulasi ETAP tidak menunjukkan perbedaan yang terlalu besar dan cenderung sama.

4.1.2 Perbandingan *Losses* Saluran

Proses pembentukan SMIB dapat dilakukan Jika nilai *losses* hasil dari simulasi matlab sudah mendekati nilai *losses* dari simulasi Etap. Perbandingan *losses* hasil simulasi matlab dengan Etap dapat dilihat pada Tabel 4.2 sebagai berikut:

Tabel 4.2 Perbandingan *Losses* Pada Program Matlab dan ETAP

No	From bus	To bus	Matlab		ETAP	
			MW	MVAR	MW	MVAR
1	PLTU Slaya Baru	Suralaya Baru	0.486	24.275	0.486	24.284
2	PLTU Slaya4	Suralaya	0.457	22.864	0.457	22.87
3	PLTU Slaya5	Suralaya	0.637	31.869	0.638	31.878
4	PLTU Slaya6	Suralaya	0.637	31.869	0.638	31.878
5	PLTU Slaya7	Suralaya	0.662	33.081	0.662	33.079
6	PLTGU Mtwar Gb1.1	Muara Tawar	0.144	7.215	0.144	7.2198
7	PLTGU Mtwar Gb1.2	Muara Tawar	0.144	7.215	0.144	7.2198
8	PLTGU Mtwar St1.0	Muara Tawar	0.119	20.248	0.119	20.252
9	PLTGU Mtwar Gt 5.1	Muara Tawar	0.124	14.912	0.124	14.923
10	PLTGU Mtwar 2.0	Muara Tawar	0.283	14.166	0.283	14.17
11	PLTGU Mtwar 3.0	Muara Tawar	0.283	14.166	0.283	14.17
12	PLTGU Mtwar 4.0	Muara Tawar	0.283	14.166	0.283	14.17
13	PLTU Tjati 3	T. Jati	0.361	43.303	0.361	43.29
14	PLTU Tjati 4	T. Jati	0.361	43.113	0.361	43.29
15	PLTU Tjati 5	T. Jati	0.961	48.037	0.961	48.027
16	PLTU Tjati 6	T. Jati	0.961	48.037	0.961	48.027
17	PLTGU Gresik 3	Gresik	0.082	12.348	0.082	12.316
18	PLTGU Jawa 3.1	Gresik	0.318	15.91	0.316	15.805
19	PLTGU Jawa 3.2	Gresik	0.553	27.669	0.55	27.497
20	PLTA Cirata1	Cirata	0.016	2.966	0.016	2.9668
21	PLTA Cirata2	Cirata	0.016	2.966	0.016	2.9668
22	PLTA Cirata3	Cirata	0.016	2.966	0.016	2.9668
23	PLTA Cirata4	Cirata	0.016	2.966	0.016	2.9668
24	PLTGU Grati Gb1.1	Grati	0.054	7.019	0.054	6.9969
25	PLTGU Grati Gb1.2	Grati	0.07	3.518	0.069	3.468

No	From bus	To bus	Matlab		ETAP	
			MW	MVAR	MW	MVAR
26	PLTGU Grati Gb1.3	Grati	0.07	3.518	0.069	3.468
27	PLTGU Grati Sb1.0	Grati	0.089	13.323	0.089	13.31
28	PLTGU Grati Sb2.0	Grati	0.175	8.755	0.174	8.7102
29	PLTA Saguling1	Saguling	0.06	3.002	0.06	3.0022
30	PLTA Saguling2	Saguling	0.06	3.002	0.06	3.0022
31	PLTU Adipala	Adipala	0.495	24.758	0.495	24.753
32	PLTU Cilacap1	Cilacap	0.533	26.648	0.533	26.644
33	PLTU Cilacap2	Cilacap	1.003	50.144	1.003	50.135
34	PLTU Paiton3	Paiton	0.543	65.193	0.58	69.556
35	PLTU Paiton5	Paiton	0.321	38.476	0.319	38.294
36	PLTU Paiton6	Paiton	0.321	38.476	0.319	38.294
37	PLTU Paiton7	Paiton	0.321	38.476	0.319	38.294
38	PLTU Paiton8	Paiton	0.321	38.476	0.319	38.294
39	PLTGU Priok	Paiton	1.006	50.318	1.007	50.337
40	PLTU Bojanegara1	Bojanegara	1.117	55.834	1.117	55.847
41	PLTU Bojanegara2	Bojanegara	1.117	55.834	1.117	55.847
42	PLTU Tanara1	Tanara	1.213	60.628	1.213	60.649
43	PLTU Tanara2	Tanara	1.213	60.628	1.213	60.649
44	PLTU Cirebon	Cirebon	1.004	50.217	1.004	50.211
45	PLTU Indramayu	Indramayu	1.015	50.73	1.015	50.728
46	PLTU Tjatia- SS1	T. Jati-SS	0.604	30.155	0.604	30.205
47	PLTU Tjatia- SS2	T. Jati-SS	0.604	30.207	0.604	30.205
48	PLTA Cisokan1	Cisokan	0.322	16.09	0.322	16.091
49	PLTA Cisokan2	Cisokan	0.322	16.09	0.322	16.091
50	PLTA Cisokan3	Cisokan	0.322	16.09	0.322	16.091
51	PLTGU Cilamaya1	Cilamaya	0.755	37.734	0.755	37.738

No	From bus	To bus	Matlab		ETAP	
			MW	MVAR	MW	MVAR
52	PLTGU Cilamaya2	Cilamaya	0.755	37.734	0.755	37.738
53	PLTU Jateng1	Jateng	0.703	35.141	0.703	35.132
54	PLTU Jateng2	Jateng	0.703	35.141	0.703	35.132
55	PLTU Banten	Banten	0.518	25.919	0.518	25.922
56	Kesugihan	Adipala	1.167	-20.12	1.167	-19.89
57	Adipala	Cilacap	0.214	-9.471	0.214	-9.22
58	Segararupek	Antosari	2.231	-216.8	2.202	-219.9
59	Banten	Suralaya Baru	0.007	-2.216	0.007	-1.969
60	Banten	Bojanegara	0.001	-27.24	0.001	-26.99
61	Saguling	Bandung Selatan	0.229	-89.31	0.232	-89.03
62	Ujung Berung	Bandung Selatan	0.007	-32.76	0.007	-32.66
63	Bandung Selatan	Mandiraca	1.931	-266	1.942	-265.6
64	Cigereleng	Bandung Selatan	0.16	-28.77	0.161	-28.51
65	Bojanegara	Balaraja	7.812	-73.95	7.813	-73.69
66	Cawang	Bekasi	0.494	-11.4	0.494	-11.25
67	Bekasi	Muara Tawar	0.897	-21.63	0.897	-21.39
68	Bekasi	Tambun	0.027	-23.37	0.027	-23.14
69	Suralaya	Balaraja	7.365	-83.89	7.366	-83.63
70	Tanara	Balaraja	1.794	-26.52	1.795	-26.26
71	Kembangan	Balaraja	2.575	2.367	2.575	2.6056
72	Cikupa	Balaraja	2.08	4.178	2.08	4.4218
73	Kediri	Bangil	0.24	-206	0.222	-207.7
74	Bangil	Paiton	1.912	-207.3	1.885	-209.3
75	Cilegon	Bogor	3.843	-76.8	3.844	-76.55
76	Bogor	Depok	0.539	-52.72	0.54	-52.47
77	Bogor	Cigereleng	1.411	-201.3	1.417	-201
78	Bogor	Cibinong	0.143	-20.22	0.143	-19.98

No	From bus	To bus	Matlab		ETAP	
			MW	MVAR	MW	MVAR
79	Cibatu Baru	Cibatu	0.036	-11.31	0.036	-11.07
80	Deltamas	Cibatu	0.155	-3.328	0.155	-3.076
81	Cilamaya	Cibatu Baru	1.993	-81.57	1.993	-81.31
82	Muara Tawar	Cibatu Baru	1.649	-61.99	1.652	-61.72
83	Depok	Cibinong	0.068	-34.27	0.068	-33.97
84	Cibinong	Tambun	0.131	-47.77	0.131	-47.51
85	Cibinong	Cisokan	2.037	-136.7	2.039	-136.3
86	Cigereleng	Tasik	0.318	-198.9	0.319	-198.6
87	Cikupa	Lekong	2.357	-16.52	2.357	-16.27
88	Cilegon	Suralaya	0.557	-24.01	0.557	-23.76
89	Cirata	Saguling	0.056	-57.81	0.056	-57.56
90	Cirata	Deltamas	0.148	-98.02	0.148	-97.77
91	Cirebon	Mandiraca	0.175	-22.69	0.175	-22.62
92	Cisokan	Saguling	0.083	-44.72	0.084	-44.46
93	Cawang	Muara Tawar	0.527	-40.44	0.528	-40.2
94	Depok	Gandul	0.091	-12.58	0.091	-12.34
95	Deltamas	Indramayu	7.502	-122.9	7.519	-122.5
96	Muara Karang	Durikosabi	0.021	-33.55	0.021	-33.32
97	Kembangan	Durikosabi	0.027	-6.619	0.027	-6.382
98	Kembangan	Gandul	0.008	-67.04	0.008	-66.79
99	Lekong	Gandul	1.063	-26.98	1.063	-26.69
100	Surabaya Sel	Grati	0.952	-118.9	0.946	-119.5
101	Krian	Grati	0.218	-184	0.231	-184.6
102	Paiton	Grati	1.821	-192.9	1.912	-193.4
103	Gresik	Tandes	0.046	-24.26	0.046	-24.11
104	Gresik	Krian	0.297	-53.19	0.3	-53.15
105	Indramayu	Tj Jati - SS	2.111	-203	2.122	-202.6
106	Jateng	Pemalang	0.979	-40.27	0.979	-40.15

No	From bus	To bus	Matlab		ETAP	
			MW	MVAR	MW	MVAR
107	Pedan	Kediri	2.773	-480.8	2.68	-484
108	Ngimbang	Krian	0.056	-49.93	0.053	-49.91
109	Ungaran	Krian	3.233	-232.8	3.212	-233.5
110	Tasik	Kesugihan	1.718	-246.3	1.705	-246.3
111	Kesugihan	Pedan	0.694	-480.7	0.743	-480.8
112	Ujung Berung	Mandiraca	1.537	-74.07	1.543	-73.76
113	Pemalang	Mandiraca	2.782	-390.5	2.808	-389.9
114	Muara Karang	Priok	0.066	-21.88	0.066	-21.64
115	Priok	Muara Tawar	0.168	-31.99	0.168	-31.75
116	Ungaran	Ngimbang	4.497	-166	4.474	-166.5
117	Tuntang	Pedan	2.036	-122.3	2.004	-122.7
118	Paiton	Watudodol	2.555	-286.3	2.528	-290
119	Tj Jati - SS	Pemalang	0.262	-337.2	0.267	-337.1
120	Pemalang	Ungaran	2.9	-154.8	2.874	-155
121	Pemalang	Tj. Jati	1.996	-449	1.999	-449
122	Watudodol	Segararupe	0.091	-9.092	0.09	-9.014
123	Suralaya Baru	Suralaya	0.023	-2.68	0.023	-2.671
124	Tj. Jati	Ungaran	9.379	-256.7	9.36	-257
125	Ungaran	Tuntang	1.823	-40.24	1.8	-38.72
TOTAL			126.74	-5977.1	126.67	-5977

Dapat dilihat pada Tabel 4.2 losses hasil simulasi ETAP dengan Matlab sudah hampir sama sehingga data aliran daya Matlab dapat digunakan pada proses *power flow tracing*.

4.2 Hasil Power Flow Tracing

Program PFT dilakukan pada daya aktif dan reaktif untuk menghasilkan nilai kontribusi tiap generator dan mengetahui *losses* pada jaringan yang dilewati aliran daya tiap generator. Berikut merupakan hasil PFT pada daya aktif dan reaktif.

4.2.1 Hasil Power Flow Tracing Daya Aktif

Hasil PFT pada aktif berupa kontribusi daya aktif pada tiap generator dan *losses* tiap generator. Pada Tabel 4.3 merupakan rekap hasil dari hasil PFT daya aktif.

Tabel 4.3 Hasil Power Flow Tracing Daya Aktif

No	Nama Pembangkit	Pembangkitan(MW)	Ploss (MW)
1	Pltu Slaya Baru	367.274	2.7263708
2	Pltu Slaya4	287.622	2.3784075
3	Pltu Slaya5	426.514	3.4862255
4	Pltu Slaya6	426.514	3.4862255
5	Pltu Slaya7	435.274	3.5690029
6	Pltgu Mtwar Gb1.1	109.732	0.2675467
7	Pltgu Mtwar Gb1.2	109.732	0.2675467
8	Pltgu Mtwar St1.0	179.679	0.3209376
9	Pltgu Mtwar Gt 5.1	189.663	0.3373013
10	Pltgu Mtwar 2.0	159.537	0.4625062
11	Pltgu Mtwar 3.0	159.537	0.4625062
12	Pltgu Mtwar 4.0	159.537	0.4625062
13	Pltu Tjati 3	469.748	5.2520952
14	Pltu Tjati 4	469.748	5.2520888
15	Pltu Tjati 5	652.248	7.752228
16	Pltu Tjati 6	652.248	7.752228
17	Pltgu Gresik Sb3	149.844	0.156057
18	Pltgu Jawa 3.1	224.571	0.4287485
19	Pltgu Jawa 3.2	374.262	0.7375982
20	Plta Cirata1	64.9173	0.0827503
21	Plta Cirata2	64.9173	0.0827503
22	Plta Cirata3	64.9173	0.0827503
23	Plta Cirata4	64.9173	0.0827503
24	Pltgu Grati Gb1.1	94.8491	0.1509146

No	Nama Pembangkit	Pembangkitan(MW)	Ploss (MW)
25	Pltgu Grati Gb1.2	94.8327	0.1673535
26	Pltgu Grati Gb1.3	94.8327	0.1673535
27	Pltgu Grati Sb1.0	154.753	0.2474073
28	Pltgu Grati Sb2.0	119.703	0.2975273
29	Plta Saguling1	79.5608	0.4392535
30	Plta Saguling2	79.5608	0.4392535
31	Pltu Adipala	398.179	1.8212982
32	Pltu Cilacap1	413.008	1.9916842
33	Pltu Cilacap2	651.695	3.3046244
34	Pltu Paiton3	597.131	2.8696543
35	Pltu Paiton5	457.896	2.1045567
36	Pltu Paiton6	457.896	2.1045567
37	Pltu Paiton7	457.896	2.1045567
38	Pltu Paiton8	457.896	2.1045567
39	Pltgu Priok	548.943	1.0570632
40	Pltu Bojanegara1	668.752	6.2476929
41	Pltu Bojanegara2	668.752	6.2476929
42	Pltu Tanara1	671.54	3.460074
43	Pltu Tanara2	671.54	3.460074
44	Pltu Cirebon	666.347	3.6533868
45	Pltu Indramayu	664.92	5.0797441
46	Pltu Tjatia-Ss1	395.682	4.318138
47	Pltu Tjatia-Ss2	395.682	4.3181405
48	Plta Cisokan1	179.044	0.9562507
49	Plta Cisokan2	179.044	0.9562507
50	Plta Cisokan3	179.044	0.9562507
51	Pltgu Cilamaya1	502.137	2.8627253
52	Pltgu Cilamaya2	502.137	2.8627253
53	Pltu Jateng1	569.455	5.5450868

No	Nama Pembangkit	Pembangkitan(MW)	Ploss (MW)
54	Pltu Jateng2	569.455	5.5450868
55	Pltu Banten	396.984	3.0154822

Untuk memvalidasi kebenaran hasil PFT daya aktif dilakukan dengan cara membandingkan hasil PFT dengan total pembangkitan dan total *losses* yang ada pada ETAP. Pada Tabel 4.4 merupakan perbandingan pembangkitan dan *losses* daya aktif hasil PFT dengan ETAP.

Tabel 4.4 *Losses* Hasil PFT Daya Aktif dengan ETAP

<i>Software</i>	Pembangkitan(MW)	Losses(MW)
PFT Matlab	19428	126.746
ETAP	19428	126.665

Dapat dilihat pada Tabel 4.4 nilai *losses* dan pembangkitan sudah hampir sama sehingga nilai *losses* dari daya aktif dapat digunakan dalam melakukan pembentukan SMIB pada generator yang akan di analisa.

4.2.2 Hasil Power Flow Tracing Daya Reaktif

Hasil PFT pada reaktif berupa *losses* generator dan *losses* saluran. Pada Tabel 4.5 merupakan rekap *losses* hasil dari hasil PFT daya reaktif pada tiap generator. Sedangkan pada Tabel 4.6 merupakan rekap *losses* hasil dari hasil PFT daya reaktif pada tiap saluran.

Tabel 4.5 *Losses* Tiap Generator Hasil PFT Daya reaktif

No	Nama Pembangkit	Q_{loss} (MVAR)
1	Pltu Slaya Baru	-0.9746644
2	Pltu Slaya4	5.2831549
3	Pltu Slaya5	3.0439738
4	Pltu Slaya6	3.0439738
5	Pltu Slaya7	4.4600773
6	Pltgu Mtwar Gb1.1	-0.3163044
7	Pltgu Mtwar Gb1.2	-0.3163044
8	Pltgu Mtwar St1.0	15.156229
9	Pltgu Mtwar Gt 5.1	-3.8824118

No	Nama Pembangkit	Q_{loss} (MVAR)
10	Pltgu Mtwar 2.0	7.8103282
11	Pltgu Mtwar 3.0	7.8103282
12	Pltgu Mtwar 4.0	7.8103282
13	Pltu Tjati 3	43.30208
14	Pltu Tjati 4	43.112267
15	Pltu Tjati 5	48.03618
16	Pltu Tjati 6	48.03618
17	Pltgu Gresik Sb3	12.34891
18	Pltgu Jawa 3.1	13.783974
19	Pltgu Jawa 3.2	24.480885
20	Plta Cirata1	-2.2336677
21	Plta Cirata2	-2.2336677
22	Plta Cirata3	-2.2336677
23	Plta Cirata4	-2.2336677
24	Pltgu Grati Gb1.1	7.0197136
25	Pltgu Grati Gb1.2	2.1135374
26	Pltgu Grati Gb1.3	2.1135374
27	Pltgu Grati Sb1.0	13.323856
28	Pltgu Grati Sb2.0	8.5932801
29	Plta Saguling1	-8.0165285
30	Plta Saguling2	-8.0165285
31	Pltu Adipala	24.757599
32	Pltu Cilacap1	26.648492
33	Pltu Cilacap2	50.144348
34	Pltu Paiton3	65.193519
35	Pltu Paiton5	38.47611
36	Pltu Paiton6	38.47611
37	Pltu Paiton7	38.47611
38	Pltu Paiton8	38.47611

No	Nama Pembangkit	Q_{loss} (MVAR)
39	Pltgu Priok	34.504066
40	Pltu Bojanegara1	25.93835
41	Pltu Bojanegara2	25.93835
42	Pltu Tanara1	43.420551
43	Pltu Tanara2	43.420551
44	Pltu Cirebon	50.216023
45	Pltu Indramayu	50.730134
46	Pltu Tjatia-Ss1	30.154713
47	Pltu Tjatia-Ss2	30.207139
48	Plta Cisokan1	9.9738202
49	Plta Cisokan2	9.9738202
50	Plta Cisokan3	9.9738202
51	Pltgu Cilamaya1	-6.0633341
52	Pltgu Cilamaya2	-6.0633341
53	Pltu Jateng1	35.140603
54	Pltu Jateng2	35.140603
55	Pltu Banten	22.254896
TOTAL		1055.734

Tabel 4.6 *Losses* Tiap Saluran Hasil PFT Daya reaktif

No	Dari Bus	Ke Bus	Q_{loss} (MVAR)
1	Suralaya Baru	Suralaya	-0.8171
2	Cawang	Bekasi	-0.4402
3	Tuntang	Pedan	-122.3119
4	Cawang	MuaraTawar	-6.7704
5	Ungaran	Tuntang	-6.0955
6	Cilegon	Suralaya	-6.8716
7	Suralaya	Balaraja	-17.9772
8	Gresik	Tandes	-2.3161
9	Sby Selatan	Grati	-30.7877

No	Dari Bus	Ke Bus	Q_{loss} (MVAR)
10	Ujung Berang	Mandiracan	-33.3504
11	Paiton	Watudodol	-495.1730
12	Kediri	Bangil	-190.8810
13	Ungaran	Ngimbang	-92.8466
14	Ngimbang	Krian	-30.5352
15	Gresik	Krian	-26.2207
16	Ungaran	Krian	-280.3457
17	Krian	Grati	-218.2930
18	Depok	Gandul	-0.4854
19	Depok	Cibinung	-3.4702
20	Bangil	Paiton	-193.7482
21	Pemalang	Mandiracan	-530.3915
22	Watudodol	Segararupek	-11.9505
23	Cirata	Saguling	-28.1502
24	Saguling	Bandung Selatan	-71.1850
25	Ujung Berang	Bandung Selatan	-31.2730
26	Bandung Selatan	Mandiracan	-282.6937
27	Tasik	Kesugihan	-338.4375
28	Kesugihan	Adipala	-9.7346
29	Adipala	Cilacap	-1.1456
30	Kesugihan	Pedan	-518.0354
31	Segararupek	Antosari	-79.0378
32	Pedan	Kediri	-583.0558
33	Paiton	Grati	-111.6260
34	Kembangan	Gandul	-55.7002
35	Banten	Suralaya Baru	-0.5590
36	Banten	Bojanegara	-37.9220
37	Bojanegara	Balaraja	-15.1020
38	Tanara	Balaraja	-2.3145

No	Dari Bus	Ke Bus	Q_{loss} (MVAR)
39	Priok	Muara Tawar	-4.7397
40	Muara Karang	Durikosambi	-3.3311
41	Muara Karang	Priok	-3.8740
42	Kembangan	Durikosambi	-0.2284
43	Kembangan	Balaraja	-0.4240
44	Cikupa	Balaraja	-1.0651
45	Cikupa	Lekong	-3.7762
46	Lekong	Gandul	-8.6425
47	Cilegon	Bogor	-57.4648
48	Bogor	Depok	-5.4308
49	Cigereleng	Tasik	-227.7373
50	Bogor	Cigereleng	-75.8360
51	Bekasi	MuaraTawar	-1.7597
52	Cilamaya	Cibatu Baru	-42.5306
53	Muara Tawar	Cibatu Baru	-16.7692
54	Cibatu Baru	Cibatu	-2.3772
55	Deltamas	Cibatu	-0.4944
56	Cirata	Deltamas	-24.6154
57	Tj Jati - SS	Pemalang	-608.9335
58	Jateng	Pemalang	-49.7004
59	Pemalang	Ungaran	-232.9415
60	Pemalang	Tanjung Jati	-587.3528
61	Tanjung Jati	Ungaran	-317.8450
62	Cirebon	Mandiracan	-28.4975
63	Indramayu	Tj Jati - SS	-104.7302
64	Deltamas	Indramayu	-36.6218
65	Cigereleng	Bandung Selatan	-14.0957
66	Bekasi	Tambun	-24.3300
67	Cibinung	Tambun	-5.9351

No	Dari Bus	Ke Bus	Q _{loss} (MVAR)
68	Cibinung	Cisokan	-43.2831
69	Cisokan	Saguling	-24.9502
70	Bogor	Cibinung	-4.4667
TOTAL			-7032.8313

Dari hasil Tabel 4.5 dan Tabel 4.6 jika kedua nilai total *losses* dijumlah akan menghasilkan nilai *losses* yang sama seperti total *losses* pada ETAP

Total *Losses* = Total *losses* generator + Total *losses* saluran

Total *Losses* = 1055,743 + (-7032,83)

Total *Losses* = -5977 MVAR

Hasil total *losses* daya reaktif sudah sama dengan hasil pada simulasi ETAP sehingga hasil PFT ini dapat digunakan untuk pembentukan SMIB dari generator yang akan dianalisa.

4.3 Pembentukan SMIB Kestabilan *Steady State*

Untuk membentu SMIB di perlukan beberapa nilai-nilai tertentu yaitu Arus generator (I_g), Resistansi ekuivalen (R_{eq}), Reaktansi ekuivalen (X_{eq}), dan tegangan pada bus *infinite* (V).

Untuk menghitung arus dari generator dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$I_g = \frac{P_{gen}/MVAbase + jQ_{gen}/MVAbase}{V_g} \quad (4.1)$$

Dengan menggunakan persamaan 4.1 maka didapat arus tiap generator pada Tabel 4.7 sebagai berikut:

Tabel 4.7 Nilai Arus Tiap Generator

No	Nama Pembangkit	I _g (pu)
1	Pltu Slaya Baru	3.89
2	Pltu Slaya4	2.99
3	Pltu Slaya5	4.46
4	Pltu Slaya6	4.46
5	Pltu Slaya7	4.54

No	Nama Pembangkit	Ig (pu)
6	Pltgu Mtwar Gb1.1	1.26
7	Pltgu Mtwar Gb1.2	1.26
8	Pltgu Mtwar St1.0	1.89
9	Pltgu Mtwar Gt 5.1	2.41
10	Pltgu Mtwar 2.0	1.71
11	Pltgu Mtwar 3.0	1.71
12	Pltgu Mtwar 4.0	1.71
13	Pltu Tjati 3	4.54
14	Pltu Tjati 4	4.54
15	Pltu Tjati 5	6.30
16	Pltu Tjati 6	6.30
17	Pltgu Gresik Sb3	1.53
18	Pltgu Jawa 3.1	2.53
19	Pltgu Jawa 3.2	4.18
20	Plta Cirata1	0.68
21	Plta Cirata2	0.68
22	Plta Cirata3	0.68
23	Plta Cirata4	0.68
24	Pltgu Grati Gb1.1	0.95
25	Pltgu Grati Gb1.2	0.95
26	Pltgu Grati Gb1.3	0.95
27	Pltgu Grati Sb1.0	1.55
28	Pltgu Grati Sb2.0	1.20
29	Plta Saguling1	0.83
30	Plta Saguling2	0.83
31	Pltu Adipala	3.93
32	Pltu Cilacap1	4.08
33	Pltu Cilacap2	6.44
34	Pltu Paiton3	6.00

No	Nama Pembangkit	Ig (pu)
35	Pltu Paiton5	4.56
36	Pltu Paiton6	4.56
37	Pltu Paiton7	4.56
38	Pltu Paiton8	4.56
39	Pltgu Priok	5.94
40	Pltu Bojanegara1	6.93
41	Pltu Bojanegara2	6.93
42	Pltu Tanara1	7.23
43	Pltu Tanara2	7.23
44	Pltu Cirebon	6.58
45	Pltu Indramayu	6.61
46	Pltu Tjatia-Ss1	3.87
47	Pltu Tjatia-Ss2	3.87
48	Plta Cisokan1	1.82
49	Plta Cisokan2	1.82
50	Plta Cisokan3	1.82
51	Pltgu Cilamaya1	5.15
52	Pltgu Cilamaya2	5.15
53	Pltu Jateng1	5.50
54	Pltu Jateng2	5.50
55	Pltu Banten	4.02

Sedangkan untuk menghitung nilai resistansi ekuivalen dan reaktansi ekuivalen dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$R_{eq} = \frac{P_{loss}/MVAbase}{I_g^2} \quad (4.2)$$

$$X_{eq} = \frac{Q_{loss}/MVAbase}{I_g^2} \quad (4.3)$$

Dengan menggunakan persamaan 4.2 dan persamaan 4.3 maka didapat nilai Req dan Xeq pada tiap generator pada Tabel 4.8 sebagai berikut:

Tabel 4.8 Resistansi dan Reaktansi Ekuivalen Tiap Generator

No	Nama Pembangkit	Req (pu)	Req (ohm)	Xeq (pu)	Xeq (ohm)
1	Pltu Slaya Baru	0.0018	4.4995	-0.0006	-1.6085
2	Pltu Slaya4	0.0027	6.6466	0.0059	14.7640
3	Pltu Slaya5	0.0018	4.3808	0.0015	3.8251
4	Pltu Slaya6	0.0018	4.3808	0.0015	3.8251
5	Pltu Slaya7	0.0017	4.3321	0.0022	5.4136
6	Pltgu Mtwar Gb1.1	0.0017	4.1896	-0.0020	-4.9532
7	Pltgu Mtwar Gb1.2	0.0017	4.1896	-0.0020	-4.9532
8	Pltgu Mtwar St1.0	0.0009	2.2482	0.0425	106.1693
9	Pltgu Mtwar Gt 5.1	0.0006	1.4500	-0.0067	-16.6902
10	Pltgu Mtwar 2.0	0.0016	3.9517	0.0267	66.7326
11	Pltgu Mtwar 3.0	0.0016	3.9517	0.0267	66.7326
12	Pltgu Mtwar 4.0	0.0016	3.9517	0.0267	66.7326
13	Pltu Tjati 3	0.0025	6.3709	0.0210	52.5265
14	Pltu Tjati 4	0.0025	6.3709	0.0209	52.2962
15	Pltu Tjati 5	0.0020	4.8768	0.0121	30.2189
16	Pltu Tjati 6	0.0020	4.8768	0.0121	30.2189
17	Pltgu Gresik Sb3	0.0007	1.6768	0.0531	132.6829
18	Pltgu Jawa 3.1	0.0007	1.6704	0.0215	53.7029
19	Pltgu Jawa 3.2	0.0004	1.0578	0.0140	35.1082
20	Plta Cirata1	0.0018	4.5033	-0.0486	-121.558
21	Plta Cirata2	0.0018	4.5033	-0.0486	-121.558
22	Plta Cirata3	0.0018	4.5033	-0.0486	-121.558
23	Plta Cirata4	0.0018	4.5033	-0.0486	-121.558
24	Pltgu Grati Gb1.1	0.0017	4.1520	0.0773	193.1261
25	Pltgu Grati Gb1.2	0.0018	4.6078	0.0233	58.1928
26	Pltgu Grati Gb1.3	0.0018	4.6078	0.0233	58.1928
27	Pltgu Grati Sb1.0	0.0010	2.5700	0.0554	138.4019

No	Nama Pembangkit	Req (pu)	Req (ohm)	Xeq (pu)	Xeq (ohm)
28	Pltgu Grati Sb2.0	0.0021	5.1629	0.0596	149.1160
29	Plta Saguling1	0.0064	16.0462	-0.1171	-292.84
30	Plta Saguling2	0.0064	16.0462	-0.1171	-292.84
31	Pltu Adipala	0.0012	2.9431	0.0160	40.0068
32	Pltu Cilacap1	0.0012	2.9900	0.0160	40.0056
33	Pltu Cilacap2	0.0008	1.9912	0.0121	30.2142
34	Pltu Paiton3	0.0008	1.9897	0.0181	45.2027
35	Pltu Paiton5	0.0010	2.5325	0.0185	46.2998
36	Pltu Paiton6	0.0010	2.5325	0.0185	46.2998
37	Pltu Paiton7	0.0010	2.5325	0.0185	46.2998
38	Pltu Paiton8	0.0010	2.5325	0.0185	46.2998
39	Pltgu Priok	0.0003	0.7478	0.0098	24.4102
40	Pltu Bojanegara1	0.0013	3.2479	0.0054	13.4842
41	Pltu Bojanegara2	0.0013	3.2479	0.0054	13.4842
42	Pltu Tanara1	0.0007	1.6569	0.0083	20.7923
43	Pltu Tanara2	0.0007	1.6569	0.0083	20.7923
44	Pltu Cirebon	0.0008	2.1108	0.0116	29.0126
45	Pltu Indramayu	0.0012	2.9047	0.0116	29.0080
46	Pltu Tjatia-Ss1	0.0029	7.1983	0.0201	50.2678
47	Pltu Tjatia-Ss2	0.0029	7.1983	0.0201	50.3552
48	Plta Cisokan1	0.0029	7.1882	0.0300	74.9743
49	Plta Cisokan2	0.0029	7.1882	0.0300	74.9743
50	Plta Cisokan3	0.0029	7.1882	0.0300	74.9743
51	Pltgu Cilamaya1	0.0011	2.6990	-0.0023	-5.7165
52	Pltgu Cilamaya2	0.0011	2.6990	-0.0023	-5.7165
53	Pltu Jateng1	0.0018	4.5785	0.0116	29.0151
54	Pltu Jateng2	0.0018	4.5785	0.0116	29.0151
55	Pltu Banten	0.0019	4.6553	0.0137	34.3569

4.4 Analisis Kestabilan *Steady State* Generator

Analisa kestabilan *steady state* diawali dengan memilih generator yang terjauh dengan beban. Pemilihan generator yang jauh dari beban didasari dari teori kestabilan *steady state* yang sudah dibahas pada bab sebelumnya. Pada kasus ini akan dilakukan analisis kestabilan *steady state* generator Tanara dengan rating 1000MW dan generator Bojanegara dengan rating 1000MW.

4.4.1 Studi Kasus Generator Tanara

Dengan menggunakan metode *Power Flow Tracing* maka akan didapatkan nilai *losses* daya aktif dan *losses* daya reaktif dari generator yang ada pada sistem JAMALI 500kV.

Nilai *losses* daya aktif dan reaktif generator Tanara dapat dilihat pada Tabel 4.3 dan Tabel 4.5. Maka didapat nilai P_{loss} dan Q_{loss} sebagai berikut

$$P_{loss} = 3.46 \text{ MW}$$

$$Q_{loss} = 43.42 \text{ MVAR}$$

Sedangkan nilai arus dari generator dapat dilihat pada Tabel 4.7 dan didapat nilai arus berikut

$$I_g = 7.23 \text{ pu}$$

Untuk menghitung nilai resistansi ekuivalen dan reaktansi ekuivalen dari saluran yang dilalui oleh transfer daya generator Tanara dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$R_{eq} = \frac{P_{loss}/MVAbase}{I_g^2} = \frac{3.46/100}{7.23^2} = 0.0007 \text{ pu} = 1.6 \Omega$$

$$X_{eq} = \frac{X_{loss}/MVAbase}{I_g^2} = \frac{43.23/100}{7.23^2} = 0.008 \text{ pu} = 20.8 \Omega$$

Nilai reaktansi generator dan nilai reaktansi trafo dapat dilihat pada Tabel 3.2 dan Tabel 3.3 sehingga didapat nilai sebagai berikut:

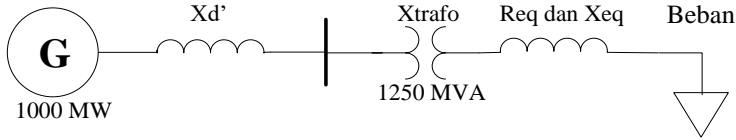
$$X'd = 0.035 \text{ pu}$$

$$X_{trafo} = 0.0116 \text{ pu}$$

Setelah semua parameter sudah di dapat maka dapat dilanjutkan dengan membentuk rangkaian SMIB dan melakukan simulasi pada software ETAP

4.4.2 Pembentukan SMIB Generator Tanara

Setelah mendapat nilai R_{eq} dan X_{eq} maka dilakukan simulasi SMIB pada *software* ETAP dengan rangkaian seperti Gambar 4.1 berikut:



Gambar 4.1 Model SMIB Generator Tanara

Gambar 4.1 merupakan model simulasi mesin tunggal Generator Tanara yang digunakan untuk menganalisa kestabilan *steady state* generator. Hasil yang didapat dari simulasi akan dibandingkan dengan hasil perhitungan manual.

Untuk mencari nilai arus yang dibangkitkan oleh generator dapat dicari dengan menggunakan persamaan (2.7) dan didapatkan nilai arus sebesar 11.76 pu. Nilai tegangan dapat dilihat pada bus pusat beban dan didapat nilai 0.9 pu.

4.4.3 Analisis Kestabilan Steady State Generator Tanara

Dengan menggunakan persamaan (2.5) dan persamaan (2.6), maka akan diperoleh hasil perhitungan nilai pembangkitan maksimum dari generator Tanara sebagai berikut:

$$E = V + I \left(R_{eq} + j(X_{eq} + X'd + Xtrafo) \right)$$

$$E = 0.9 + 11.76 \angle -31.7^\circ (0.0007 + j(0.008 + 0.035 + 0.012))$$

$$E = 0.9 + 11.76 \angle -31.7^\circ \times 0.0007 + j 0.0546$$

$$E = 1.357 \angle 23.8^\circ \text{ pu}$$

Nilai E merupakan tegangan internal yang ada didalam generator. Nilai ini kemudian dimasukkan ke persamaan (2.5) untuk menghitung P_{maks} .

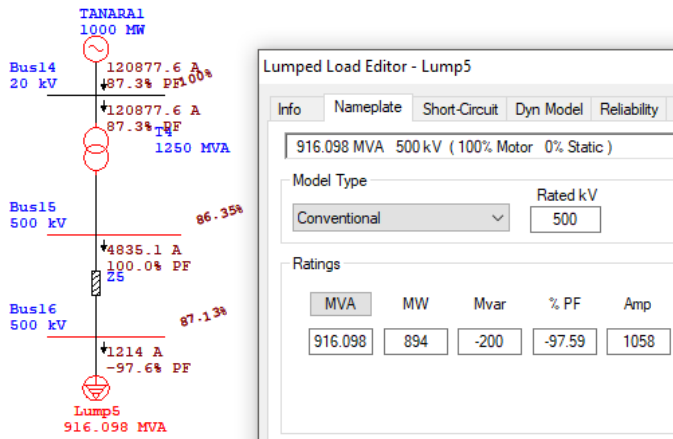
$$P_{maks} = \frac{E \times V}{X_{tot}} \sin \delta$$

$$P_{maks} = \frac{1.357 \angle 23.8^\circ \times 0.9}{0.0546} \sin 23.8$$

$$P_{maks} = 9.103 \text{ pu} = 910 \text{ MW}$$

4.4.4 Validasi Hasil Hitungan Generator Tanara

Validasi hasil perhitungan manual dibandingkan dengan simulasi ETAP dengan cara menggunakan rangkaian SMIB yang sudah dibuat di ETAP dan generator di beri beban yang nilai bebannya di naikan secara terus-menerus sampai sistem tidak konvergen.



Gambar 4.2 Simulasi SMIB Pada ETAP

Dapat dilihat pada Gambar 4.2, nilai 895 MW merupakan batas kritis dari pembebanan generator. Perbandingan hasil simulasi ETAP dengan analisa perhitungan manual menggunakan metode *power flow tracing* dapat dilihat pada Tabel 4.9 berikut:

Tabel 4.9 Perbandingan Hasil Simulasi ETAP dengan PFT

Kriteria	ETAP (MW)	PFT (MW)	Error%
Pmaks	895	910	1.5

Dapat dilihat Tabel 4.9 hasil analisa *Power Flow Tracing* sudah mendekati hasil dari simulasi ETAP dengan error 1.5%, Sehingga dapat disimpulkan generator Tanara tidak dapat dibebani maksimum karena nilai Pmaksnya berada dibawah rating generator.

4.4.5 Studi Kasus Generator Bojanegara

Dengan menggunakan metode *Power Flow Tracing* maka akan didapatkan nilai *losses* daya aktif dan *losses* daya reaktif dari generator yang ada pada sistem JAMALI 500kV.

Nilai *losses* daya aktif dan reaktif generator Bojanegara dapat dilihat pada Tabel 4.3 dan Tabel 4.5. Maka didapat nilai Ploss dan Qloss sebagai berikut

$$P_{\text{loss}} = 6.247 \text{ MW}$$

$$Q_{\text{loss}} = 25.938 \text{ MVAR}$$

Sedangkan nilai arus dari generator dapat dilihat pada Tabel 4.7 dan didapat nilai arus berikut

$$I_g = 6.93 \text{ pu}$$

Untuk menghitung nilai resistansi ekuivalen dan reaktansi ekuivalen dari saluran yang dilalui oleh transfer daya generator Tanara 1 dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$R_{eq} = \frac{P_{loss}/MVAbase}{I_g^2} = \frac{6.247/100}{6.93^2} = 0.00129 \text{ pu} = 3.24 \Omega$$

$$X_{eq} = \frac{X_{loss}/MVAbase}{I_g^2} = \frac{25.938/100}{6.93^2} = 0.0054 \text{ pu} = 13.48 \Omega$$

Nilai reaktansi generator dan nilai reaktansi trafo dapat dilihat pada Tabel 3.2 dan Tabel 3.3 sehingga didapat nilai sebagai berikut:

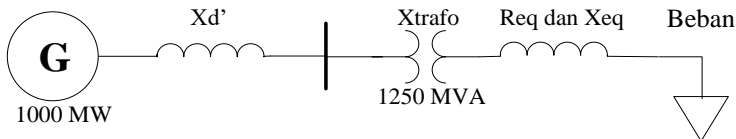
$$X'd = 0.035 \text{ pu}$$

$$X_{trafo} = 0.0116 \text{ pu}$$

Setelah semua parameter sudah di dapat maka dapat dilanjutkan dengan membentuk rangkaian SMIB dan melakukan simulasi pada software ETAP

4.4.6 Pembentukan SMIB Geneator Bojanegara

Setelah mendapat nilai R_{eq} dan X_{eq} maka dilakukan simulasi SMIB pada *software* ETAP dengan rangkaian seperti Gambar 4.3 berikut:



Gambar 4.3 Model SMIB Generator Bojanegara

Gambar 4.3 merupakan model simulasi mesin tunggal Generator Bojanegara yang digunakan untuk menganalisa kestabilan *steady state* generator. Hasil yang didapat dari simulasi akan dibandingkan dengan hasil perhitungan manual.

Untuk mencari nilai arus yang dibangkitkan oleh generator dapat dicari dengan menggunakan persamaan (2.7) dan didapatkan nilai arus sebesar 11.76 pu. Nilai tegangan dapat dilihat pada bus pusat beban dan didapat nilai 1 pu.

4.4.7 Analisa Kestabilan Steady State Generator Bojanegara

Dengan menggunakan persamaan (2.5) dan persamaan (2.6), maka akan diperoleh hasil perhitungan nilai pembangkitan maksimum dari generator Bojanegara 1 sebagai berikut:

$$E = V + I \left(R_{eq} + j(X_{eq} + X'd + Xtrafo) \right)$$

$$E = 0.9 + 11.76 \angle -31.7^\circ (0.0013 + j(0.005 + 0.035 + 0.01))$$

$$E = 0.9 + 11.76 \angle -31.7^\circ \times 0.00129 + j 0.0522$$

$$E = 1.4 \angle 20.6^\circ \text{ pu}$$

Nilai E merupakan tegangan internal yang ada didalam generator. Nilai ini kemudian dimasukkan ke persamaan (2.5) untuk menghitung Pmaks.

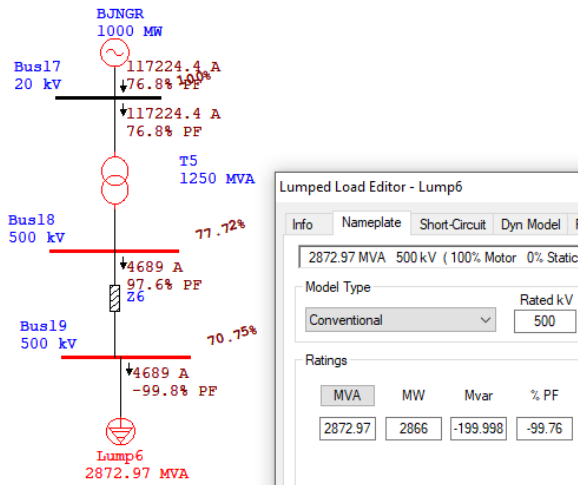
$$P_{maks} = \frac{E \times V}{X_{tot}} \sin \delta$$

$$P_{maks} = \frac{1.4 \times 0.9}{0.0052}$$

$$P_{maks} = 2854 \text{ MW}$$

4.4.8 Validasi Hasil Hitungan Generator Bojanegara

Validasi hasil perhitungan manual dibandingkan dengan simulasi ETAP dengan cara menggunakan rangkaian SMIB yang sudah dibuat di ETAP dan generator di beri beban yang nilai bebannya di naikan secara terus-menerus sampai sistem tidak konvergen.



Gambar 4.4 Simulasi SMIB Pada ETAP

Dapat dilihat pada Gambar 4.4, nilai 2867 MW merupakan batas kritis dari pembebanan generator. Perbandingan hasil simulasi ETAP dengan analisa perhitungan manual menggunakan metode *power flow tracing* dapat dilihat pada Tabel 4.10 berikut:

Tabel 4.10 Perbandingan Hasil Simulasi ETAP dengan PFT

Kriteria	ETAP (MW)	PFT (MW)	Error(%)
Pmaks	2867	2854	0.5

Dapat dilihat Tabel 4.10 hasil analisa *Power Flow Tracing* sudah mendekati hasil dari simulasi ETAP dengan error 0.5%, Sehingga dapat disimpulkan generator Bojanegara dapat dibebani maksimum karena nilai Pmaksnya berada diatas rating generator.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

- 1) Metode *Power Flow tracing* dapat digunakan untuk menyederhanakan sistem multi mesin menjadi mesin tunggal berdasarkan konsep pelacakan aliran daya pada tiap generator.
- 2) Analisa kestabilan *steady state* generator dapat dilakukan menggunakan rangkaian mesin tunggal hasil dari *power flow tracing*.
- 3) Pada generator Tanara didapat hasil pembebanan maksimal generator berada di bawah rating generator sehingga generator Tanara tidak dapat di bebani 100% dari rating generator.
- 4) Pada generator Bojanegara di dapat hasil pembebanan maksimal generator berada di atas rating generator sehingga generator Bojanegara dapat dibebani 100% dari rating generator.

5.2 Saran

Pada penelitian selanjutnya sebaiknya hasil analisa kestabilan *steady state* generator menggunakan metode *power flow tracing* dibandingkan dengan kurva kapabilitas generator yang ada pada pembangkit.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Kundur, "Power System Stability and Control," *EPRI power system engineering series*. p. 1176, 1994.
- [2] M. John Gibbard, *Small-signal stability, control and dynamic performance of power systems*. 2009.
- [3] P. S. R. Murty, *Power System Analysis*. 2007.
- [4] A. Soeprijanto, *Analisa Kestabilan Multi Generator dengan Konsep Mesin Tunggal*. 2017.
- [5] H. Saadat, "Power System Analysis." .
- [6] Rusilawati, "Penentuan Batas Kestabilan Steady State Generator Dengan Konsep Rei-Dimo," in *Seminar Nasional "Inovasi dalam Desain dan Teknologi" - IDEaTech*, 2015, pp. 9–17.
- [7] K. Himaja, T. S. Surendra, and S. T. Kalyani, "Steady State Stability Analysis Of A Single Machine Power System Using Matlab," vol. 1, no. 7, pp. 1–6, 2012.
- [8] K. Xie, J. Zhou, and W. Li, "Analytical model and algorithm for tracing active power flow based on extended incidence matrix," vol. 79, pp. 399–405, 2009.
- [9] A. Enshaee and P. Enshaee, "New reactive power flow tracing and loss allocation algorithms for power grids using matrix calculation," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 87, pp. 89–98, 2017.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

LAMPIRAN A

A.1. SLD JAMALI 500kV 2019

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Nama : Imam Darmawan
TTL : Bangkalan, 19 Juli 1995
Jenis Kelamin : Laki - Laki
Agama : Islam
Alamat : Jalan KH Lemah Duwur
VIII/27A Bangkalan
Telp/HP : 085730222914
E-mail : imam13@mhs.ee.its.ac.id

• RIWAYAT PENDIDIKAN

1. 2001 – 2007 : SD Negeri Pejagan 2 Bangkalan
2. 2007 – 2010 : SMP Negeri 1 Bangkalan
3. 2010 – 2013 : SMA Negeri 1 Bangkalan
4. 2013 – 2016 : D3 Teknik Elektro, Program Studi Komputer Kontrol - FTI Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
5. 2016 – 2018 : S1 Teknik Elektro, Program Studi Teknik Sistem Tenaga – FTE Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

• PENGALAMAN KERJA

1. Kerja Praktek di PT. IPMOMI PLTU PAITON
2. Kerja Praktek di PT. PETROKIMIA GRESIK

Halaman ini sengaja dikosongkan